

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет біотехнології і біотехніки**

**Кафедра біотехніки та інженерії**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ В.М. Мельник  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістра  
зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування  
на тему: «Модернізація установки виробництва лимонної кислоти»**

Виконав:  
студент VI курсу, групи БІ-71мп  
Комлев Олексій Олександрович \_\_\_\_\_

Керівник:  
к.т.н., доцент  
Ружинська Л.І. \_\_\_\_\_

Консультант з розробки стартап-проекту:  
к.е.н., доцент  
Ткаченко Т.П. \_\_\_\_\_

Рецензент \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Факультет біотехнології і біотехніки**

**Кафедра біотехніки та інженерії**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 133 «Галузеве машинобудування» («Обладнання фармацевтичних та біотехнологічних виробництв»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис) В.М. Мельник  
(ініціали, прізвище)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

**Комльову Олексію Олександровичу**

1. Тема дисертації: «Модернізація установки виробництва лимонної кислоти», науковий керівник дисертації Ружинська Людмила Іванівна, затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. №\_\_
2. Термін подання студентом дисертації \_\_\_\_\_
3. Об'єкт дослідження: випарний апарат з виносною гріючою камерою
4. Предмет дослідження: процес випарювання, характеристики міцності і стійкості випарного апарата та окремих його конструктивних елементів.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: провести літературний аналіз за темою дисертації, дослідити стан проблеми; розглянути математичну модель процесу випарювання, провести чисельний експеримент на її основі; запропонувати оптимізаційну конструкцію випарного апарату; розробити конструкцію та 3D модель випарного апарату.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:.. Апаратурно-технологічна схема виділення та очистки лимонної кислоти (А1); Випарний апарат з виносною гріючою камерою. Складальні креслення (А0); Корпус гріючої камери. Складальне креслення (А2); Кришка сепаратора. Складальне креслення (А2); Решітка трубна (А3); Труба вентиляційна (А3); Корпус бризкоуловлювача (А3); Кришка. Складальне креслення (А3); Плакати за темою магістерської дисертації.

7. Орієнтовний перелік публікацій: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка стартап - проекту	к.е.н., доцент Ткаченко Т. П.,		

9. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Літературний огляд; дослідження стану проблеми	03.09.2018- 03.12.2018	
2	Теоретичні дослідження;	15.10.2018- 12.11.2018	
3	Патентний пошук; розробка конструкції випарного апарату;	10.09.2018- 15.10.2018	
4	Проведення комп'ютерного моделювання; оформлення результатів експерименту	12.11.2018- 03.12.2018	
5	Практична реалізація; розроблення технічної документації на випарний апарат з виносною гріючою камерою	04.04.2018- 30.04.2018	
6	Розробка стартап-проекту	05.11.2018- 07.12.2018	
7	Оформлення пояснювальної записки, креслень та документації	10.09.2018- 07.12.2018	

Студент

О.О. Комлев

Науковий керівник дисертації

Л.І. Ружинська

## РЕФЕРАТ

УДК 66.048.911

Атестаційна робота освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр» на тему: «Модернізація установки виробництва лимонної кислоти» / НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»; Керівник Ружинська Л.І. – К., 2018. – 167 с.: іл. – 34. Виконавець Комлева О.О. – Бібліогр.: 28п.

Робота складається з переліку умовних позначень, вступу, п'яти розділів, висновків, переліку посилань і додатків. Повний обсяг роботи становить 167 сторінок, 34 рисунків, 24 таблиці і переліку посилань з 28 найменувань (на 3 сторінках).

Лимонну кислоту застосовують у багатьох галузях промисловості. Найбільш широке застосування вона знайшла у харчовій промисловості в якості харчової добавки.

Найважливішою ділянкою теплової схеми виробництва лимонної кислоти, де виникає необхідність у концентруванні розчинів, є випарна установка, призначена для згущення розчину.

Об'єктом дослідження слугує випарний апарат з виносною гріючою камерою з природною циркуляцією.

Предметом дослідження є процес випарювання, характеристики міцності і стійкості випарного апарата та окремих його конструктивних елементів.

Мета магістерської дисертації полягає у дослідженні процесів випарювання та розробці конструкції випарного апарату з виносною гріючою камерою.

Проведені математичні та комп'ютерні дослідження показали, що запропонована конструкція є ефективнішою за аналоги та може бути використана при конструюванні нового обладнання або вдосконаленні вже існуючого.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ЛИМОННА КИСЛОТА, ВИПАРНИЙ АПАРАТ, ВИПАРЮВАННЯ.



## ANOTATION

Attestation work of the educational qualification level "Master" on the theme: "Modernization of equipment for producing citric acid" / NTUU "KPI named after Igor Sikorsky"; Head Ruzhinska L.I. - K., 2018. - 167 p. Il. - 34. Performer Komliev O.O. - Bibliographer: 28p.

The work consists of a list of symbols, an introduction, five sections, conclusions, a list of references and annexes. The full volume of work is 167 pages, 34 figures, 24 tables and a list of references from 39 titles (on 4 pages).

Citric acid is used in many industries. She has found the widest use in the food industry as a food additive..

The most important part of the thermal scheme of citric acid production, where there is a need for concentration of solutions, is an evaporation plant designed to thicken the solution.

The object of the study is an evaporation apparatus with a removable grinding chamber with natural circulation.

The subject of the study is a mathematical model of the evaporation process and the characteristics of the nature and stability of the evaporator with a removable grinding chamber and its individual structural elements.

The purpose of the study is to study the evaporation processes and the development of the design of the evaporator with a remote grinding chamber.

The conducted mathematical and computer studies have shown that the proposed design is more effective than analogues and can be used in the design of new equipment or the improvement of existing.

**KEY WORDS:** CITRIC ACID, STEAM UNIT, STEAMING.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначень та термінів .....	9
Вступ.....	12
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ .....	15
1.1 Застосування лимонної кислоти у промисловості.....	15
1.2 Способи і методи випарювання.....	17
1.3 Огляд конструкцій випарних апаратів .....	18
1.4 Патентне дослідження випарних апаратів .....	30
1.5 Порівняльний аналіз конструкцій випарного апарату з діючими аналогами.....	31
1.6 Висновки.....	35
1.7 Постановка задач дослідження.....	35
2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВИПАРЮВАННЯ .....	36
2.1 Просте випарювання .....	36
2.2 Моделювання процесів випарювання .....	38
2.3 Модель технологічного розрахунку режимів випарювання .....	41
2.4 Висновки.....	47
3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИПАРНОГО АПАРАТУ З ВИНОСНОЮ ГРІЮЧОЮ КАМЕРОЮ.....	48
3.1 Основи методу скінчених елементів .....	48
3.1 Побудова 3D моделі та конструктивний розрахунок.....	50
3.3 Висновки.....	60
4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ.....	61
4.1 Опис технологічного процесу виробництва лимонної кислоти .....	61

4.2 Обґрунтування вибору конструкції випарного апарату.....	64
4.2.1 Опис конструкції випарного апарату .....	64
4.2.2 Вибір матеріалів для виготовлення випарного апарату .....	65
4.3 Технічна характеристика випарного апарату .....	67
4.4 Розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність конструкції випарного апарату .....	68
4.4.1 Технологічний розрахунок випарного апарату .....	68
4.4.2 Гідравлічний розрахунок випарного апарату .....	77
4.4.3 Розрахунок барометричного конденсатора.....	78
4.4.4 Розрахунок штуцерів випарного апарату.....	82
4.4.5 Розрахунок товщини стінки деталей випарного апарату .....	85
4.4.5.1 Розрахунок товщини стінки деталей гріючої камери .....	86
4.4.5.1.1 Розрахунок товщини стінки корпусу гріючої камери .....	86
4.4.5.1.2 Розрахунок товщини стінки днища гріючої камери .....	87
4.4.5.1.3 Розрахунок товщини стінки царги гріючої камери .....	88
4.4.5.1.4 Розрахунок товщини стінки кришки гріючої камери .....	90
4.4.5.2 Розрахунок товщини стінки деталей сепаратора .....	92
4.4.5.2.1 Розрахунок товщини стінки верхньої царги сепаратора .....	92
4.4.5.2.2 Розрахунок товщини стінки нижньої царги сепаратора.....	93
4.4.5.2.3 Розрахунок товщини стінки днища сепаратора .....	95
4.4.5.2.4 Розрахунок товщини стінки кришки сепаратора .....	97
4.4.5.3 Розрахунок товщини стінки циркуляційної труби .....	98
4.4.6 Розрахунок трубної решітки .....	99
4.4.7 Розрахунок фланцевих з'єднань випарного апарату .....	102
4.4.7.1 Розрахунок фланцевого з'єднання гріючої камери .....	105

4.4.7.2 Розрахунок фланцевого з'єднання сепаратора .....	110
4.4.7.3 Розрахунок фланцевого з'єднання циркуляційної труби.....	115
4.4.8 Перевірка несучої спроможності обичайки випарного апарату під дією опорних навантажень .....	121
4.4.8.1 Перевірка несучої спроможності обичайки грійучої камери під дією опорних навантажень .....	121
4.4.8.2 Перевірка несучої спроможності обичайки сепаратора під дією опорних навантажень .....	124
4.5 Рекомендації з ремонту, монтажу та експлуатації апаратів в установці.	126
4.6 Висновки .....	129
5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ .....	131
5.1 Резюме.....	131
5.2 Аналіз зовнішнього та внутрішнього середовища .....	134
5.3. Метод Шонфільда. Визначення ключових факторів успіху проекту. ....	140
5.4 Оцінка ринкових позицій .....	145
5.5 Оцінка ризиків та страхування розробки .....	152
5.6 Калькуляція собівартості .....	156
5.7 Методи ціноутворення .....	160
5.8 Висновки .....	163
ВИСНОВКИ .....	164
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	165
Додаток А	
Додаток Б	

## Перелік скорочень, умовних позначень та термінів

$H$  – насос;

$B$  – випарний апарат;

$G_n$  – початкова масова витрата розчину лимонної кислоти, кг/с;

$p_l$  – тиск пари у сепараторі, Па;

$a_n$  – початкова концентрація розчину лимонної кислоти, %;

$a_k$  – кінцева концентрація розчину лимонної кислоти, %;

$t_n$  – початкова температура розчину лимонної кислоти, °С;

$p_{zn}$  – тиск гріючої пари, Па;

$x$  – паровміст гріючої пари;

$t_{zn}$  – температура гріючої пари, °С;

$t_{кип}$  – температура кипіння розчину лимонної кислоти в трубах, °С;

$t_k$  – температура розчину лимонної кислоти в сепараторі, °С;

$t_l$  – температура у паровому просторі, °С;

$t_0$  – температура у барометричному конденсаторі, °С;

$p_0$  – тиск вторинної пари у барометричному конденсаторі, Па;

$\Delta t_{гс}$  – гідравлічна депресія, °С;

$\Delta t_{депр}$  – температурна депресія, °С;

$T_l$  – температура кипіння води, °С;

$r_l$  – теплота пароутворення, Дж/кг;

$\Delta^{атм}$  – температурна депресія при атмосферному тиску, °С;

$t_{кип.л.к.}$  – температура кипіння розчину лимонної кислоти, °С;

$t_{кип.води}$  – температура кипіння води, °С;

$\Delta t_{гд}$  – гідростатична депресія, °С;

$t_{ср}$  – середня температура кипіння розчину лимонної кислоти, °С;

$p_{ср}$  – середній тиск у трубах, Па;

$\rho_p$  – густина розчину, кг/м<sup>3</sup>;

$H_p$  – висота рівня, м;

$H_{тр}$  – висота гріючих труб, м;

$\Delta t_{\text{заг}}$  – загальна різниця температур, °С;  
 $t_{\text{гн}}$  – температура гріючої пари, °С;  
 $\Delta t_{\text{нов}}$  – корисна різниця температур, °С;  
 $G_{\text{к}}$  – кінцева масова витрата розчину лимонної кислоти, кг/с;  
 $W$  – кількість випареної вологи, кг/с;  
 $\Delta_{\text{ст}}$  – товщина стінки, м;  
 $\lambda_{\text{ст}}$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки, Вт/м·К;  
 $r_{\text{забр1}}$  – термічний опір стінки, викликаний забрудненням на поверхні гріючих труб зі сторони руху вторинної пари, м<sup>2</sup>·К/Вт;  
 $r_{\text{забр2}}$  – термічний опір стінки викликаний забрудненням на поверхні гріючих труб зі сторони руху розчину лимонної кислоти, м<sup>2</sup>·К/Вт;  
 $k$  – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м<sup>2</sup>·К;  
 $y$  – коефіцієнт, що залежить від питомого теплового потоку;  
 $q$  – питомий тепловий потік, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $F$  – площа поверхні теплообміну, м<sup>2</sup>;  
 $D$  – діаметр гріючої камери, м;  
 $D_1$  – діаметр сепаратора, м;  
 $D_2$  – діаметр циркуляційної труби, м;  
 $d$  – діаметр гріючих труб, м;  
 $\Delta$  – шорсткість труб, м;  
 $G_{\text{нов}}$  – масова продуктивність вакуум-насосу, кг/с;  
 $V_{\text{нов}}$  – об'ємна продуктивність вакуум-насосу, м<sup>3</sup>/с;  
 $R$  – універсальна газова стала, Дж/моль·К;  
 $M_{\text{нов}}$  – молярна маса повітря, кг/моль;  
 $t_{\text{нов}}$  – температура повітря у барометричному конденсаторі, °С;  
 $p_{\text{нов}}$  – тиск повітря у барометричному конденсаторі, Па;  
 $p_{\text{н}}$  – тиск насиченої водяної пари при температурі повітря у барометричному конденсаторі, Па;  
 $N_{\text{нов}}$  – потужність на валу вакуум-насосу, Вт;

$D_y$  – діаметр умовного проходу штуцерів, м;  
 $D_\phi$  – діаметр фланця штуцера, м;  
 $p$  – максимально можливий тиск у штуцері, Па;  
 $\tau$  – термін роботи апарату, роки;  
 $g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  
 $[p]$  – допустимий тиск, Па;  
 $p_{\text{гд}}$  – гідростатичний тиск, Па;  
 $K_1, K_2, K_3, K_4$  – коефіцієнти для визначення товщини стінки, напруженої зовнішнім тиском;  
 $[p]_M$  – допустимий зовнішній тиск з умов міцності в умовах пружності, Па;  
 $[p]_E$  – допустимий зовнішній тиск з умов стійкості в умовах пружності, Па;  
 $B_1$  – коефіцієнт для визначення допустимого тиску;  
 $K_e$  – коефіцієнт, необхідний для визначення допустимого тиску;  
 $x'$  – коефіцієнт, що враховує відношення товщини стінки обичайки до її діаметру;  
 $D_K$  – розрахунковий діаметр конічної частини, м;  
 $t$  – крок розміщення труб, м;  
 $p_k$  – тиск у кожусі гріючої камери, Па;  
 $p_m$  – тиск у гріючих трубах, Па;  
 $t_k$  – температура в кожусі гріючої камери,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $t_m$  – температура в трубах гріючої камери,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $Q''$  – осьове зусилля, що виникає в гріючій камері внаслідок різниці температур, Н;  
 $\sigma''$  – напруження зусилля, що виникає в гріючій камері внаслідок різниці температур, Па;  
 $F_{\text{опр}}$  – навантаження на одну опору, Н;  
 $G_{\text{опр}}$  – вага випарного апарату, Н;  
 $D_{\text{заг}}$  – загальна кількість деталей у апараті, шт;

## Вступ

Продукти мікробіологічного синтезу широко використовують у хімічній і харчовій промисловості, медицині, сільському господарстві та інших галузях [1].

Досягнення в галузі біотехнології дозволяють прискореними темпами розвивати мікробіологічну промисловість [2]. Протягом останніх десятиліть у нашій країні та за її межами стрімко розвиваються такі напрямки промислової біотехнології як виробництво антибіотиків, вітамінів, амінокислот, ферментів, органічних кислот та інших цільових продуктів. Особлива увага у галузі виробництва органічних кислот приділяється харчовим кислотам – лимонній, молочній, яблучній, ітаковій та іншим [3].

Серед органічних кислот, отриманих мікробіологічним способом, лимонна кислота, завдяки своїм смаковим якостям і фізико-хімічним властивостям, найширше застосовується у ряді галузей [1].

Можливість отримання лимонної кислоти шляхом культивування мікроскопічних грибів на цукрових поживних середовищах була відкрита німецьким вченим К. Вемером у 1893 році. На території колишнього СРСР його наступником був В. Л. Омелянський, а з часом – В. С. Буткевич та С. П. Костичев. У розвиток і удосконалення вітчизняного виробництва вагомий вклад зробили Г. І. Журавський, Є. Я. Щербакова, В. Ф. Федосєєв та інші [2].

Серед відомих способів отримання лимонної кислоти найперспективнішим виявився глибинний, тобто культивування на рідких поживних середовищах. У даному випадку важлива роль відводиться виділенню цільового продукту з культуральної рідини, його концентруванню, кристалізації та сушінню.

У магістерській дисертації освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр з галузевого машинобудування» розглядається концентрування лимонної кислоти у випарному апараті..



Процес отримання лимонної кислоти з цитрату калію представляє собою хімічну реакцію розщеплення, яка відбувається з виділенням теплоти. Внаслідок цього утворюється водний розчин лимонної кислоти та випадають нерозчинні у воді кристали гіпсу.

Процес випарювання використовують для концентрування розчинів нелетких речовин з рідких летких розчинників, до яких відноситься і розчин лимонної кислоти. Цей процес полягає в тому, що шляхом нагрівання, а іноді і зниження тиску, деяку частину розчинника (води) у вигляді пари видаляють з розчину. Даний процес широко використовують для часткового розділення (концентрування) розчинів та для повного виділення твердих речовин із нього [4].

Випарювання у промислових умовах відбувається у апаратах одноразової та багаторазової дії. Найчастіше процес відбувається безперервно у однокорпусних та багатокорпусних апаратах [5].

Процес випарювання лимонної кислоти проводиться в два етапи. Я розглядаю перший. Випарювання ведеться в однокорпусному випарному апараті з природною циркуляцією і виносною гріючою камерою [3].

На даному виробництві метою процесу сушіння є видалення поверхневої вологи, зберігаючи при цьому гідратну. Тому при сушінні лимонної кислоти використовується барабанна сушарка, яка відноситься до конвективних [3].

У магістерській дисертації розглядається виділення лимонної кислоти із культуральної рідини, отриманої мікробіологічним способом. Особлива увага приділяється проектуванню випарного апарату для проведення процесу концентрування лимонної кислоти. Даний апарат повинен задовольняти вимогам, що висуваються до нього технологічним процесом, відповідати умовам техніки безпеки та забезпечувати високу якість продукції, що виробляється.

**Об'єкт дослідження:** установка для виробництва лимонної кислоти, а саме випарний апарат з виносною гріючою камерою з природною циркуляцією.

**Предмет дослідження:** процес випарювання та характеристики міцності і стійкості випарного апарата з виносною гріючою камерою та окремих його конструктивних елементів.

Метою магістерської дисертації є дослідження процесів випарювання та розробка конструкції випарного апарату з виносною гріючою камерою

## 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

### 1.1 Застосування лимонної кислоти у промисловості

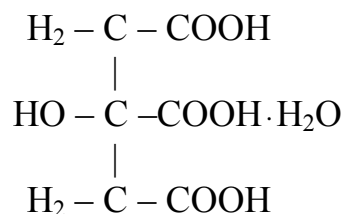
Лимонну кислоту застосовують у багатьох галузях промисловості [1]. Найбільш широке застосування вона знайшла у харчовій промисловості в якості харчової добавки E330 [2]. Лимонну кислоту використовують при виробництві лимонадів, фруктових соків, есенцій, лікерів, різноманітних драже та карамельок, морозива, тортів, кремів та інших виробів. Також її можна використовувати для продовження терміну зберігання м'яса, жирів, маргаринів, масла. При консервуванні лимонна кислота сприяє збереженню кольору фруктів та овочів, а також вмісту вітамінів і корисних речовин, підвищенню смакових якостей кінцевої продукції.

У косметичній промисловості лимонну кислоту використовують при виробництві кремів по догляду за шкірою та для продовження терміну їх використання. У фармацевтичній – при консервуванні крові, виготовленні препаратів для лікування нирок та антирахітних засобів.

У комунальному господарстві лимонну кислоту використовують для усунення накипу із котлів та систем гарячого водопостачання, в металургійній промисловості – в якості хімічного полірувального засобу для міді, алюмінію та інших кольорових металів, як одну зі складових гальванічних ванн при легуванні металів, наприклад, міді [1].

Лимонна кислота – це органічна кислота, що міститься у фруктах, овочах, молоці і м'ясі. В організмі людини при обміні речовин лимонна кислота утворюється під час розщеплення жирів і вуглеводів. Це білий без запаху кристалічний порошок з приємним м'яким кислим смаком [1].

Вона належить до оксікислот та має наступну структурну формулу:



Лимонна кислота при температурі нижче 36,6 °С утворює кристали з однією молекулою води у формі великих безбарвних ромбічних призм, при температурі вище 36,6 °С – утворює безводні кристали у формі моноклінних призм. Гідратована лимонна кислота  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$  містить 8,58 % води. На сухому повітрі вода, що входить в кристали, вивітрюється, внаслідок чого кристали стають непрозорими і розсипаються. При повільному нагріванні до 70-75 °С кристали розм'якшуються, при швидкому нагріванні до 100 °С – плавляться, при 130 °С – стають повністю безводними [2].

Кристали лимонної кислоти добре розчиняються у воді, при цьому її розчинність підвищується з підвищенням температури, а також в чистому і розбавленому спирті, в ацетоні, ефірі і інших органічних розчинниках.

Лимонна кислота розкладається внаслідок термічних навантажень. Вона може виявляти хімічні властивості як кислот, так і спиртів. Карбоксильна і гідроксильна групи вступають в реакцію незалежно одна від одної. Це зумовлює утворення взаємного впливу між функціональними групами лимонної кислоти, як наслідок – виникнення особливих властивостей останньої [2].

Кислота, яку ми розглядаємо, належить до слабких електролітів, що пов'язано з оборотністю процесу дисоціації, причому з підвищенням температури ступінь дисоціації зростає [2].

Лимонна кислота може утворювати солі та складні ефіри, а також вступати в ряд інших хімічних реакцій, властивих оксикислотам.

## 1.2 Способи і методи випарювання

Процес випарювання може здійснюватися під вакуумом, при атмосферному та надмірному тиску.

При випаровуванні під вакуумом знижується температура кипіння розчину, що дозволяє використовувати для обігріву апарату гріючий пар низького тиску. Спосіб застосуємо при випаровуванні розчинів, чутливих до високої температури. Крім того, збільшення різниці температур пари, що гріє і киплячого розчину дозволяє зменшити поверхню теплообміну і габаритні розміри апарата.

Випарювання при атмосферному тиску є найбільш простим, але найменш економічним способом, оскільки вторинна пара зазвичай не використовується і викидається в атмосферу.

Випарювання під надлишковим тиском викликає підвищення температури кипіння розчину, що дозволяє використовувати вторинний пар (екстрапара) для інших теплотехнічних цілей. Однак даний метод можна застосовувати тільки для випарювання термічностійких речовин і здійснимо при використанні високотемпературної гріючої пари.

Розрізняють також просте випарювання, що проводиться в однокорпусних випарних установках, в яких гріючий пар використовується одноразово.

Для економії пари, що гріє застосовують багаторазове випарювання, здійснюване в багатокорпусних установках, в яких вторинна пара кожного попереднього корпусу використовується в якості гріючого для подальшого корпусу. Первинний пар обігріває в цьому випадку тільки перший корпус. Тиск в корпусах по ходу руху пара при здійсненні такого способу постійно знижується.

Економія первинного пару може бути досягнута в однокорпусному випарній установці завдяки застосуванню теплового насоса шляхом підвищення теплозбереження вторинної пари в результаті її стиснення в

турбокомпресорі або інжекторі з подальшим використанням в тому ж випарному апараті.

За принципом роботи випарні апарати поділяються на періодично діючі і неперервно діючі.

Періодичне випарювання застосовується для отримання розчинів високих концентрацій при невеликій продуктивності.

### 1.3 Огляд конструкцій випарних апаратів

Випарний апарат повинен відповідати ряду вимог: бути простим, компактним, надійним в експлуатації; мати високу продуктивність; допускати можливо більші напруги поверхні нагріву і високі коефіцієнти теплопередачі при мінімальній вазі і вартості.

Різноманітність конструкцій випарних апаратів ускладнює їх класифікацію. Так, випарні апарати можуть підрозділятися в залежності:

- від розташування і виду поверхні нагріву;
- конфігурації поверхні нагріву;
- компоновки поверхні нагріву;
- роду теплоносія;
- взаємного розташування робочих середовищ;
- кратності і режиму циркуляції.

По методу випаровування випарні установки бувають

- поверхневого типу, в яких розчин контактує з поверхнею теплообміну;
- контактного типу, в яких нагрівання здійснюється без розділяючої поверхні теплообміну;
- адіабатного випаровування.

Розглянемо найпоширеніші в промисловості конструкції випарних апаратів.

1) Випарний апарат з центральною циркуляційною трубою (рис. 1.1) має нагрівальну камеру, що складається з корпусу 1 з кип'ятильними

трубками 2 і центральною циркуляційною трубою 3 великого діаметру, закріпленими в трубних решітках. Гріюча пара подається в міжтрубний простір, конденсується і відводиться з апарату у вигляді конденсату. Початковий упарюваний розчин безперервно подається зверху, а упарений розчин також безперервно віддаляється через штуцер, що знаходиться в днищі апарату, або через ліхтар 7, який призначений для підтримки постійного рівня розчину в апараті.

У ньому за допомогою труби 6 підтримується той же тиск, що і в сепараторі 5. Паротворення усередині центральної труби значно менше, ніж в кип'ятильних трубах, оскільки на одиницю об'єму рідини в ній доводиться менша теплопередавальна поверхня.

Внаслідок цього густина паро-рідинної емульсії (практично рідини) в центральній трубі більше, ніж в кип'ятильних трубах. Це викликає природну циркуляцію розчину: гідростатичним тиском стовпа рідини в циркуляційній трубі розчин передавлюється в кип'ятильні трубки, підіймається по них вгору, частково випаровується і, звільнений вгорі від пари, повертається вниз по центральній трубі. Пара, що утворюється, віддаляється у верхній частині апарату, пройшовши заздалегідь через краплевловлювач 4.

Недоліком даного апарату є жорстка конструкція гріючої камери, що не має температурної компенсації. Апарати можуть бути використані тільки для упарювання розчинів, що не кристалізуються, оскільки інакше в трубах можуть утворюватися кристалічні пробки.

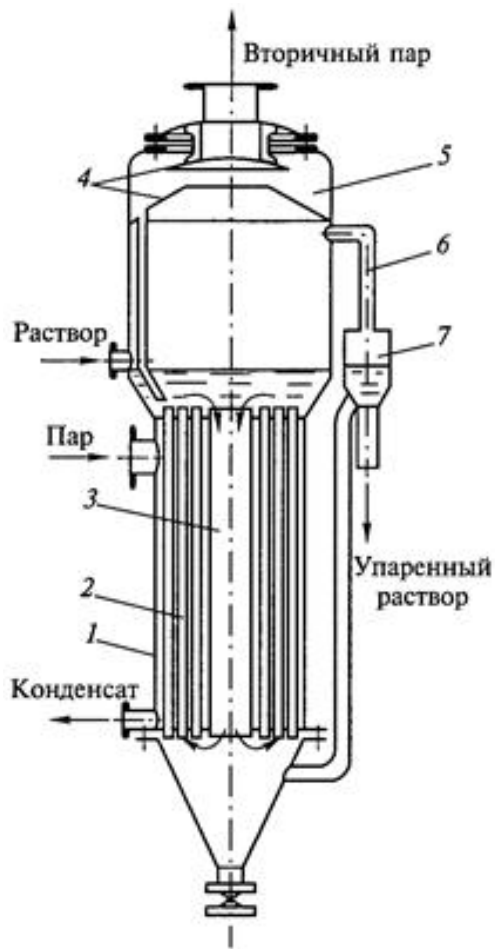


Рис. 1.1. Схема випарного апарату з центральною циркуляційною трубою:

1 — корпус; 2 — кип'ятильні трубки; 3 — циркуляційна труба; 4 — краплевловлювач; 5 — сепаратор; 6 — труба; 7 — ліхтар

Випарний апарат з підвісною гріючою камерою (рис. 1.2) складається з гріючої камери 4, яка вільно підвішується усередині корпусу 5, спираючись на лапи 6. Гріюча пара подається в міжтрубний простір нагрівальної камери по трубі 3, конденсат віддаляється по трубі 7. Вторинна пара, що утворюється, проходить простір сепарації над гріючими трубками і далі інерційний краплевловлювач 1, з якого уловлена рідина стікає вниз по трубі 2.

Принцип циркуляції тут той же: малоемульгований розчин через велику густину опускається вниз по кільцевому простору між корпусом



апарату і нагрівальною камерою, передавлюючи вгору легшу парорідинну емульсію, що постійно утворюється в трубках.

Завдяки більшому перетину кільцевого каналу гідравлічний опір циркуляційного контуру тут менше, слідством чого є збільшення швидкості циркуляції розчину.

Проте апарати даного типу володіють дещо більшою матеріаломісткістю, ніж з центральною циркуляційною трубою. У них також не можна обробляти високов'язкі і розчини, що кристалізуються.

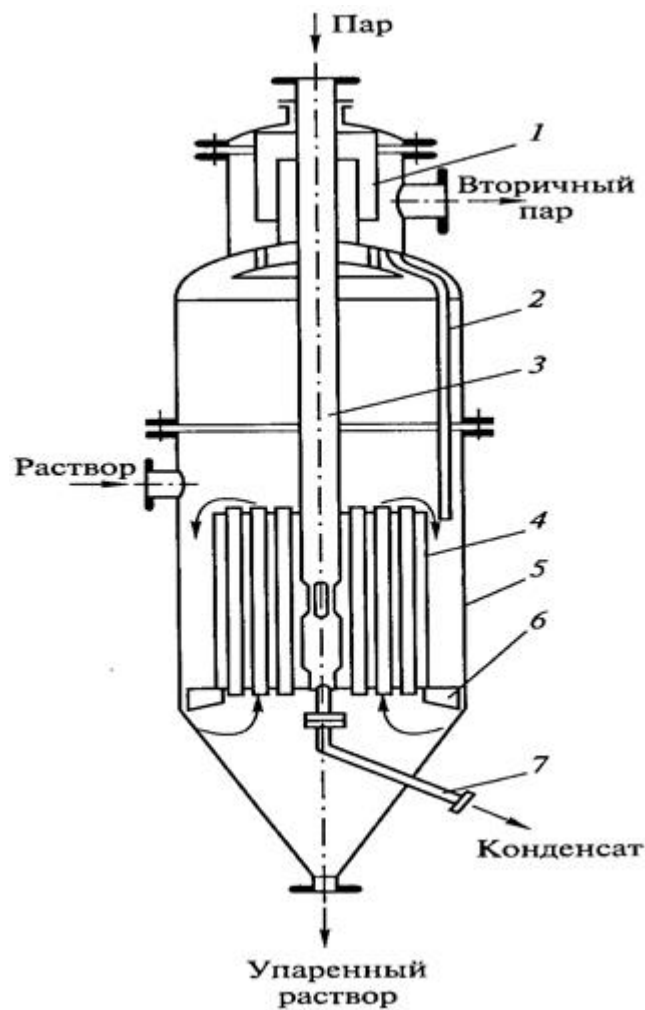


Рис. 1.2 Схема випарного апарату з підвісною гріючою камерою:

1 — краплєвловлювач; 2 — труба для стікання уловленої рідини; 3 — труба для подачі гріючої пари; 4 — гріюча камера; 5 — корпус; 6 — лапа; 7 — труба для видалення конденсату

Випарний апарат з винесеною гріючою камерою (рис. 1.3) складається з нагрівальної камери (кип'ятильника) 2 і сепаратора б, сполучених між собою патрубком 3 і циркуляційною трубою 8. Через цю трубу більша частина концентрованого розчину повертається назад в нижню частину кип'ятильника, змішуючись з початковим розчином, який подається через патрубок 1. Частина концентрованого розчину відводиться з сепаратора у вигляді готового продукту через патрубок 7. Вторинна пара, пройшовши бризковловлювач 5, віддаляється з сепаратора через верхній патрубок 4.

Висота трубок в таких апаратах складає 5 ...7 м. Перетин циркуляційної труби рівний або більше площі поперечного перетину всіх кип'ятільних трубок. Слідством великої рушійної сили циркуляції (різниці тиску стовпа суцільної, некиплячої рідини в циркуляційній трубі 8 і парорідинної емульсії усередині кип'ятільних трубок) при невеликому гідравлічному опорі циркуляційного контуру є значна швидкість циркуляції розчину (до 1,5 м/с).

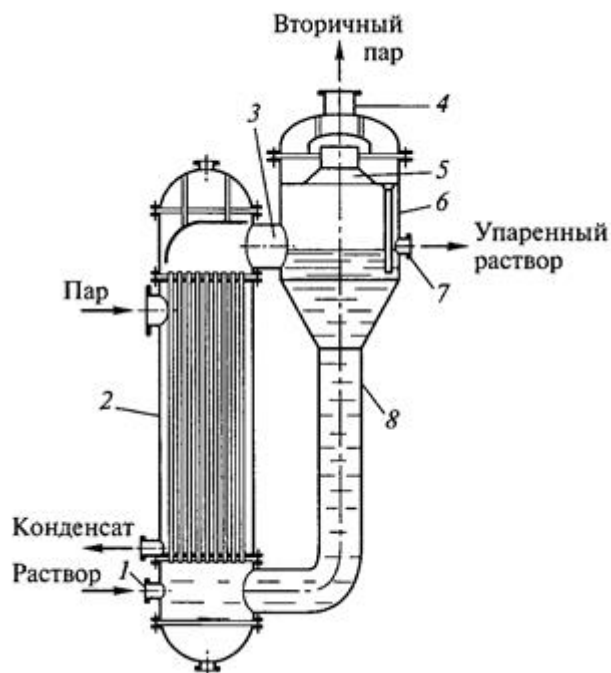


Рис. 1.3. Схема випарного апарата з винесеною гріючою камерою:

1, 7 — патрубки; 2 — нагрівальна камера; 3, 4 — патрубки; 5 — бризковловлювач; 6 — сепаратор; 8 — циркуляційна труба

Випарний апарат з винесеною зоною кипіння (рис. 1.4) застосовують для розділення розчину на розчинник і розчинену речовину. В цих умовах речовина часто випадає із розчину у вигляді кристалів. У таких випадках звичайно застосовуються апарати з виносною нагрівальною камерою і винесеною зоною кипіння. Нагрівальна камера 1 сполучена з сепаратором 2 трубою 3. Рівень рідини в сепараторі підтримується на лінії верхнього обріза труби 3, що досягається відбором суспензії через ліхтар 4. У нагрівальних трубках розчин випробовує додатковий тиск стовпа рідини, що знаходиться в трубі 3. Висота підйомної труби, тобто гідростатичний тиск стовпа рідини, підбирається таким, щоб в нагрівальних трубках відбувався тільки нагрів розчину. Інтенсивне паротворення починається лише під час переходу розчину в підйомну трубу і сепаратор. Різниця тиску стовпа рідини в сепараторі і парорідинної емульсії в підйомній трубі забезпечує природну циркуляцію розчину. Щоб зменшити опір циркуляційного контуру, відношення перетину підйомної труби до перетину гріючих трубок приймають (з урахуванням збільшення об'єму парорідинної емульсії, що утворюється) рівним 1,5 ... 2,0.

Залежно від довжини трубок, різниці температур пари і рідини, а також тиску в сепараторі швидкість циркуляції розчину в трубках коливається в межах 1,2 ... 2,0 м/с.

Велика швидкість циркуляції, винесення зони кипіння з гріючих трубок і підтримка постійної кількості кристалів в циркулюючій суспензії (не менше 5 ... 10 %) у багатьох випадках запобігають утворенню накипу і кристалів на гріючих трубках.

Швидкість циркуляції в цих апаратах обмежена. Для підтримки великих швидкостей циркуляції необхідна значна різниця температур гріючої пари і розчину (до 20 ... 25 °С). Тому в них не завжди можна запобігти утворенню накипу і кристалів.

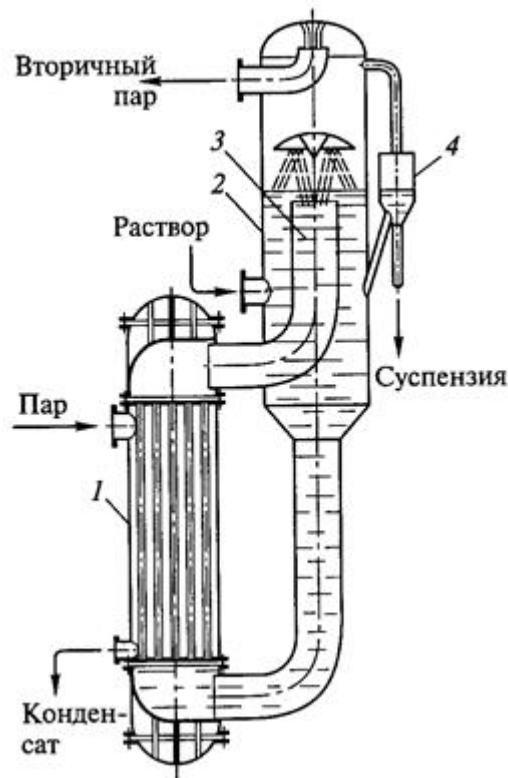


Рис. 1.4. Схема випарного апарату з винесеною зоною кипіння:

1 —нагрівальна камера; 2 — сепаратор; 3 — труба; 4 — ліхтар

Випарний апарат з примусовою циркуляцією розчину (рис. 1.5) застосовують для створення великих швидкостей руху упарюваного розчину щодо теплопередавальної поверхні. Найчастіше в цьому випадку використовуються апарати з виносною гріючою камерою. Розчин прокачується через нагрівальну камеру 1, сепаратор 2 і зворотну трубу 4 насосом 5 (відцентровим або осьовим).

Осьовий насос більш ефективний, оскільки перекачує великі маси рідини при малому протитиску. Живлячий розчин подається в зворотну трубу і змішується з великою кількістю циркулюючого розчину. Суспензію відводять через ліхтар 3.

Споруда і експлуатація таких випарних апаратів дорожчі через високу вартість насоса і велику витрату енергії на перекачування. Оптимальна швидкість циркуляції розчину по трубках — 2 ...3 м/с.

При менших швидкостях можливе відкладення солі на теплопередавальній поверхні. Збільшення швидкості циркуляції неекономічне через різке зростання гідравлічного опору контуру, а отже, і великі витрати енергії на привід насоса. Крім того, при швидкості руху розчину вище 3,0... 3,5 м/с стає помітним механічне стирання кристалів (при упарюванні розчинів до появи твердої фази).

Великі швидкості циркуляції в цих апаратах можуть бути забезпечені при будь-якій малій різниці температур між паром, що конденсується, і циркулюючим розчином. Тому в них створюються найсприятливіші умови для попередження утворення пристінних осадів.

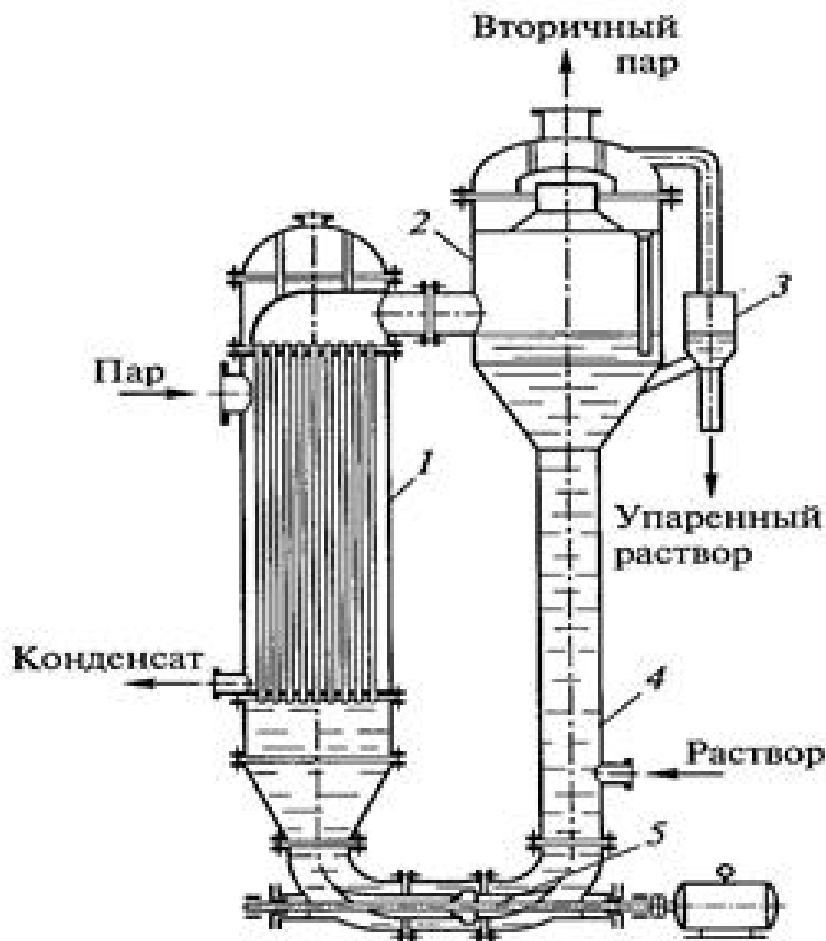


Рис. 1.5. Схема випарного апарату з примусовою циркуляцією розчину:

- 1 — нагрівальна камера; 2 — сепаратор; 3 — ліхтар; 4 — труба;  
5 — насос

Випарний апарат з плівкою, що підіймається (рис. 1.6), складається з кип'ятильних труб великої висоти (б... 9 м), що дозволяє випаровувати розчин від початкової до кінцевої концентрації за час одноразового проходу його через кип'ятильні труби (без циркуляції).

Свіжий розчин, підігрітий до температури кипіння, подається в трубки знизу через патрубок 1 в днищі апарату. Закипаючи в нижній частині трубок, розчин у вигляді парорідинної емульсії підіймається вгору, створюючи кільцевий режим кипіння майже по всій довжині трубок.

Цей кільцевий режим забезпечує великі значення коефіцієнта тепловіддачі.

При великій довжині трубок досить одноразового проходу розчину через апарат для упарювання його до необхідної концентрації. Концентрований розчин викидається з трубок у верхній частині апарату в сепаратор 2 і у вигляді готового продукту відводиться через патрубок 3.

Апарат може працювати при меншій різниці температур між гріючою парою і розчином, ніж випарні апарати з природною циркуляцією розчину. Відсутність циркуляції і велика швидкість руху випаровуваного розчину по трубках обумовлюють невеликий час перебування його в апараті. Кипіння в плівці, а не в об'ємі розчину, що підіймається, попереджає утворення піни. Тому застосування даних апаратів особливо доцільне при випаровуванні пінистих розчинів, а також розчинів, що не терплять перегріву і чутливих до тривалого нагрівання. Недоліком цих апаратів є те, що в них потрібно підтримувати постійний термо- і гідродинамічний режими, оскільки при недостатній подачі розчину тут можливе обсихання стінок, що абсолютно неприпустимо через обростання їх шаром кристалів, а при надмірній подачі — зменшення концентрації упареного розчину. Ці апарати непридатні для упарювання розчинів, що кристалізуються.

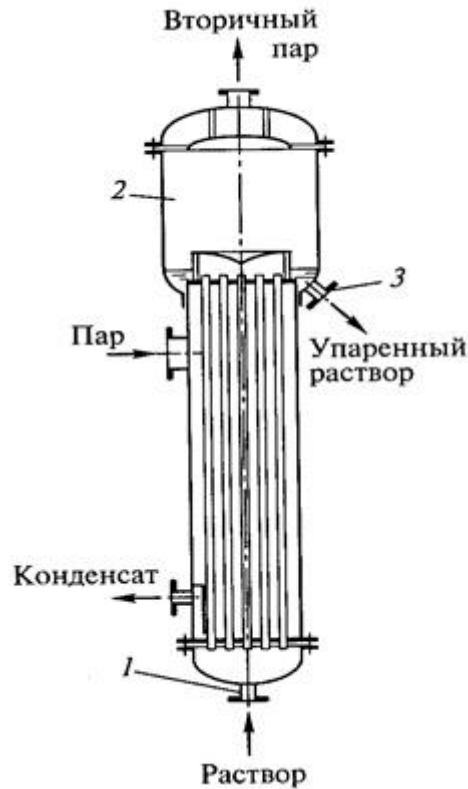


Рис. 1.6. Схема выпарного аппарата с плівкою, що підіймається:

1, 3 — патрубки; 2 — сепаратор

Випарний апарат з низхідною (падаючою) плівкою (рис. 1.7) використовують звичайно для розчинів, чутливих до тривалої дії високих температур. У цьому апараті розчин подається на верхню трубну решітку 1, звідки стікає у вигляді тонкої плівки по стінках кип'ятильних трубок 2. Для створення тонкої стійкої плівки у верхній частині трубок встановлені спеціальні розподіляючі пристрої. Упарений розчин відділяється від вторинної пари в сепараторі 3. У цьому апараті кільцевий режим з високим значенням коефіцієнта тепловіддачі існує по всій висоті гріючих трубок, а час перебування розчину в трубках ще менше, оскільки пара захоплює за собою розчин, сприяючи збільшенню швидкості стікання плівки.

Цей апарат може працювати при ще меншій різниці температур між парою, що конденсується, і розчином, ніж випарний апарат з плівкою, що підіймається. У апараті можна створити такий режим роботи, при якому пара

утворюватиметься не на стінці, а на поверхні плівки з боку парового простору. В результаті зменшується небезпека утворення накипу і кристалів, попереджається піноутворення, полегшується сепарація вторинної пари.

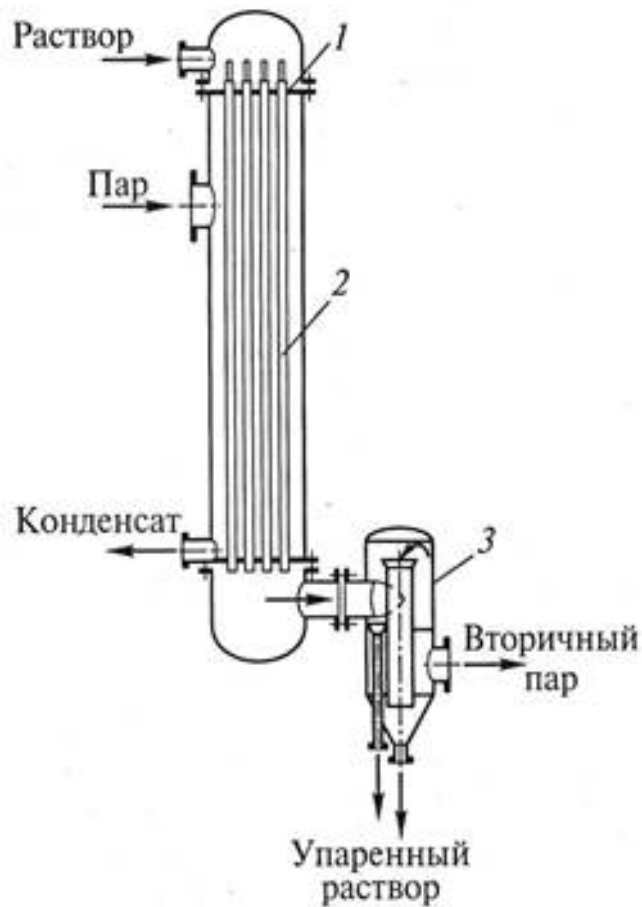


Рис. 1.7. Схема випарного апарату з низхідною (падаючою) плівкою:

1 — трубна решітка, 2 — кип'ятильна трубка, 3 — сепаратор

Роторний прямотічний апарат (рис. 1.8) застосовують для випаровування нестійких до підвищених температур в'язких і пастоподібних розчинів. Усередині циліндрового корпусу 1 апарату, забезпеченого паровими оболонками 4, обертається ротор, що складається з вертикального валу 2 (розташованого по осі апарату) і шарнірно закріплених на ньому скребків 3.

Випаровуваний розчин поступає в апарат зверху, захоплюється скребками, що обертаються, під дією відцентрової сили відкидається до стінок апарату і переміщається по їх внутрішній поверхні у вигляді плівки.



Поступово відбувається повне випаровування плівки, і на стінках апарату утворюється тонкий шар порошку або пасти, який знімається скребками, що обертаються (зазор між зовнішньою кромкою скребків і стінкою апарату складає менше 1 мм). Твердий або пастоподібний продукт віддається через спеціальний секторний затвор з днища апарату.

У роторних прямотічних апаратах досягається інтенсивний теплообмін (до 15000 Вт/м<sup>2</sup> К.) при невеликому віднесенні рідини вторинною парою. В той же час роторні апарати складні у виготовленні і відрізняються відносно високою вартістю експлуатації через наявність частин, що обертаються, непридатні для використання у великотоннажних виробництвах.

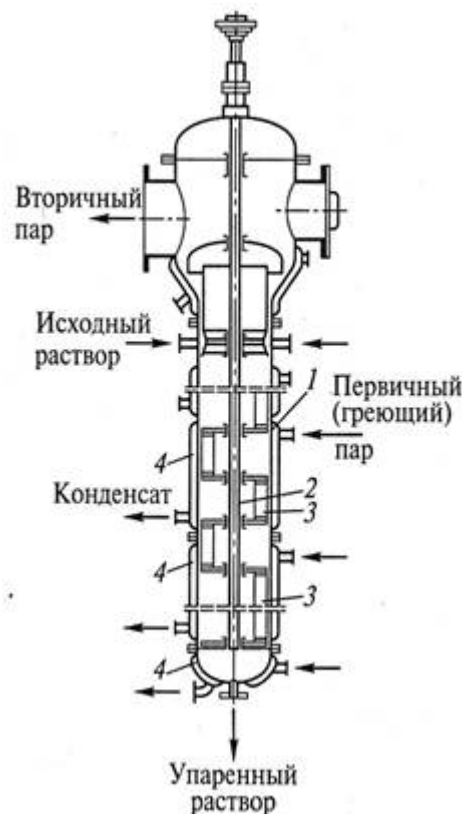


Рис. 1.8. Схема роторного прямотічного випарного апарату:

1 – корпус, 2 — вал, 3 — скребок, 3 – скребок, 4 – парова сорочка

Для виготовлення випарних апаратів як конструкційні матеріали застосовуються вуглецеві, кислотостійкі сталі і мідь.

Випарні апарати і окремі елементи виготовляють із сталей, дозволених до застосування Держміськтехнаглядом: ВСтЗсп, ВСтЗГпс, 06ХН28МДТ, 09Г2С, 16ГС1, 08Х18Г8Н2Т, 08Х22Н6Т, 08Х21Н, 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т.

Крім того, застосовують двошарові сталі з плакіруючим шаром: 08Х13, 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т.

Для виготовлення оболонок, дотичних з морською водою, застосовують двошарову сталь СтЗ + 12Х18Н10Т; внутрішні устрої апаратів виконують з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т.

#### 1.4 Патентне дослідження випарних апаратів

Патентне дослідження – це системний науковий аналіз властивостей об’єкта господарської діяльності (ОГД) протягом його життєвого циклу, які впливають з правової охорони об’єктів промислової власності.

У даному випадку дослідження проводиться з метою визначення патентної ситуації щодо проєктованих апаратів (визначення їх патентоспроможності й тенденцій розвитку). Предметом патентного дослідження є випарний апарат, а об’єктами винаходи та корисні моделі. Дослідження проводилося на основі патентної бази України та Російської Федерації.

Провівши патентне дослідження можна побачити, що в даний час застосовуються різні типи апаратів, що проєктуються. Їх різноманіття обумовлюється сферою їх використання, особливістю теплових режимів та масообмінних процесів, що підтримуються під час проведення технологічного процесу. Патентний пошук та огляд літератури підтвердили відповідність обраних конструкцій сучасному науково-технічному рівню.

### 1.5 Порівняльний аналіз конструкцій випарного апарату з діючими аналогами

Таблиця 1.1 Регламент пошуку для порівняльного аналізу конструкцій випарного апарату

(форма Б.1 згідно з ДСТУ 3575-97)

Предмет пошуку (ОГД, його складові частини)	Мета пошуку інформації	Держава пошуку	Класифікаційні індекси: МПК,НПК,МКПЗ, МКТП,УДК	Ретроспективність пошуку	Джерела інформації
1	2	3	4	5	6
Випарний апарат	Визначення патентоздатності проєктованого апарату й визначення тенденцій розвитку цього напрямку в техніці	Україна, Російська Федерація	МПК6 і МПК7- B01D 1/00; B01D 1/06; B01D 1/22; F22B 37/00; F28D 9/00; УДК 621.929.3; 66.023 (088.8)	2001-2011	Описи до винаходів, офіційні патентні бюлетені Держпатенту України і Роспатенту

Таблиця 1.2 Джерела інформації, використані під час проведення пошуку конструкцій випарного апарату

Предмет пошуку (ОГД, його складові частини)	Держава пошуку	Класифікаційні індекси: МПК,НПК,МКПЗ, МКТП,УДК	Інформаційна база, використана під час пошуку	Бібліографічні дані за хронологією патентна інформація	Першого та останнього джерела інформації інша науково-технічна інформація
1	2	3	4	5	6
Випарний апарат	Україна, Російська Федерація	МПК6 і МПК7- B01D 1/00; B01D 1/06; B01D 1/22; F22B 37/00; F28D 9/00; УДК 621.929.3; 66.023 (088.8)	Фонд НТУУ "КПІ"; фонди Державної науково-технічної бібліотеки України; офіційні сайт Держпатенту України та Роспатенту.	Описи винаходів патентів України №№ 1-41000. Описи корисних моделей патентів України №№ 1-150. Описи винаходів патентів Російської Федерації №№ 200000-241000.	Національні й зарубіжні офіційні бюлетені, описи винаходів і корисних моделей; УРЖ "Джерело" (2005-2010pp.). Журнал "Хімічна промисловість України". Плановский А.Н., Николаев П.И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии.-М. Химия, 1987.-496с.

Таблиця 1.3 Патентна документація, відібрана для подальшого аналізу з обраною конструкцією випарного апарату

ОГД, його складові частини	Бібліографічні дані	Відомості, щодо їхньої дії
1	2	3
Випарний апарат з підвісною гріючою камерою	Патент № 72504 (UA), B01D 1/00, 1/06. Випарат апарний з підвісною гріючою камерою / Мовчанов Володимир Іванович (UA); Гринько Іван Дмитрович (UA); Гітіс Едуатр Борисович (UA); Ніколенко Валентина Миколаївна (UA); Костіна Тетяна Іванівна (UA). Заявка № 2001106716, 01.10.2001. Опубл. 15.03.2005; бюл. № 3, 2005р.	діє
Випарний апарат з природною циркуляцією	Патент № 77151 (UA), B01D 1/06. Випарний апарат з природною циркуляцією / Мовчанов Володимир Ігнатійович (UA); Гринько Іван Дмитрович (UA); Іващенко Олександр Яковлевич (UA); Гринько Олександр Іванович (UA). Заявка № 2002010670, 28.01.2002. Опубл. 15.11.2005; бюл. № 11, 2005р.	діє
Випарний апарат	Патент № 80776 (UA), B01D 1/00; F22B 37/00. Випарний апарат / Приходченко Вілен Антонович (UA). Заявка № a200601495, 14.02.2006. Опубл. 25.10.2007.	діє
Плівковий випарний апарат	Патент № 28618 (UA), B01D 1/22. Плівковий випарний апарат / Ладановський Михайло Іванович (UA); Василяка Олександр Сергійович (UA); Пристрома Євгеній Олександрович (UA). Заявка № u200712095, 01.11.2007. Опубл. 10.12.2007.	діє
Прямоточно-плівковий випарний апарат	Патент № 39933 (UA), B01D 1/22. Прямоточно-плівковий випарний апарат / Шуцький Ігор Валентинович (UA). Заявка № u200807337,	діє

	27.05.2008. Опубл. 25.03.2009; бюл.№ 6, 2009р.	
Пластинчатий випарний апарат	Патент № 88836 (UA), B01D 1/00, 1/22; F28D 9/00. Пластинчатий випарний апарат / Данилов Юрій Борисович (UA); Товажнянський Леонід Леонідович (UA); Перцев Леонід Петрович (UA). Заявка № а200805791, 05.05.2008. Опубл. 25.11.2009; бюл.№ 22, 2009р.	діє
Випарний апарат	Патент № 39933 (RU), B01D. Випарний апарат / Хомяков Анатолій Павлович (RU); Хомяков Констянтин Анатолійович (RU). Опубл. 10.03.2007.	діє
Випарний апарат	Патент № 2323762 (RU), B01D. Випарний апарат / Трофімоа Леон Ігнатович (RU); Подберезний Валерій Лазарович (RU); Нікулін Валерій Олексійович (RU). Опубл. 10.05.2008.	діє

## 1.6 Висновки

1. Проведене літературне дослідження підтвердило, що лимонна кислота є широко застосованою речовиною у великій кількості промисловостей і найбільш розповсюдженою є харчова.

2. Розглянули способи і методи випарювання зробимо висновок, що випарні установки безперервної дії мають більшу продуктивності, більш економічні у тепловому відношенні, легко автоматизуються і регулюються.

3. В залежності від типу та умов виробництва, об'ємів випуску продукції, габаритних розмірів та інших параметрів існує значна кількість видів випарних апаратів, які мають свої особливості та переваги над іншим аналогами.

4. Патентний пошук та огляд літератури підтвердили відповідність обраних конструкцій сучасному науково-технічному рівню.

## 1.7 Постановка задач дослідження

1. Дослідження процесів випарювання в випарному апараті з виносною грюючою камерою та природною циркуляцією;

2. Створення комп'ютерної моделі випарного апарату;

4. Дослідження характеристик міцності та стійкості випарного апарату та його конструктивних елементів;

## 2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВИПАРЮВАННЯ

### 2.1 Просте випарювання

Просте випарювання здійснюється на установках невеликої продуктивності, коли витрати теплоти не мають великого значення. Матеріальний баланс простого випарювання включає два рівняння, складені:

по матеріальних потоках

$$G_n = G_k + W \quad (1)$$

по розчиненій речовині

$$G_n x_n = G_k x_k$$

де  $G_n$ ,  $G_k$  - масова витрата початкового (упарюваного) і кінцевого (упареного) розчину;  $W$  - масова витрата розчинника, що випарюється;  $x_n$ ,  $x_k$  - відсотки (масові частки) розчиненої речовини в початковому і кінцевому розчинах..

Тепловий баланс простого випарювання може бути записаний на основі потоків приходу і витрати теплоти.

Визначимо:  $D$  - масова витрата гріючої пари;  $i_{пар}$ ,  $i_{в.п}$ ,  $i_{конд}$  - питомі ентальпії гріючої і повторної пари, а також конденсату;  $t_n$ ,  $t_k$  - початкова і кінцева температури розчину;  $\Delta q$  - теплота концентрування від концентрації  $x_n$  до концентрації  $x_k$ ;  $c_n$ ,  $c_k$  - питома теплоємність вихідного (початкового) і кінцевого розчинів.

У цьому випадку тепловий баланс буде засновуватися на наступних теплових потоках:

#### ***Надходження теплоти***

З вихідним розчином

$$G_n c_n t_n$$

З гріючим паром

#### ***Витрата теплоти***

З кінцевим розчином

$$G_k c_k t_k$$

З вторинним паром



$Di_{пар}$  $Wi_{в.п}$ 

З теплою концентрування

 $0,01G_K x_K \Delta q$ 

З конденсатором

 $Di_{конд}$ 

Теплові втрати

 $Q_{п}$ 

Тоді тепловий баланс простого випарювання буде:

$$G_n c_n t_n + Di_{пар} = G_K c_K t_K + Wi_{в.п} + 0,01G_K x_K \Delta q + Di_{конд} + Q_{п} \quad (3)$$

Замінивши у рівнянні (3) відповідно до рівняння (1)  $G_n$  на  $G_K + W$  та вирішивши його відносно витрати гріючої пари, отримаємо

$$D = G_K \frac{c_K t_K - c_n t_n + 0,01 x_K \Delta q}{i_{пар} - i_{конд}} + W \frac{i_{в.п} - c_n t_n}{i_{пар} - i_{конд}} + \frac{Q_{п}}{i_{пар} - i_{конд}} \quad (4)$$

З рівності (4) слідує, що загальна витрата пари визначається трьома доданками, які можна інтерпретувати таким чином: перше - витрата пари на зміну теплосодержання упарюваного розчину, другу - витрата пари на утворення повторної пари і третє - витрата пари на компенсацію втрат теплоти в довкілля.

Значення першого і останнього складових невелики в порівнянні з другим, тому при наближених розрахунках вважається, що 1 кг води, що випаровується з розчину вимагає витрат 1,1...1,2 кг гріючих пари.

Площа поверхні теплообміну випарного апарату визначається відповідно до основного рівняння теплопередачі

$$F = \frac{Q}{K \Delta t_{п.р.}}$$

де  $Q$  - теплове навантаження апарату;  $K$  - коефіцієнт теплопередачі;  $\Delta t_{п.р.}$  - корисна різниця температур.

При розрахунках випарних апаратів враховують наступні температурні характеристики:

- загальну різницю температур - різниця між температурою гріючої пари  $t_{гр.п}$ , що поступає у випарний апарат, і температурою вторинної пари  $t_{в.п}$ , яка відбирається з апарату:

$$\Delta t_{общ} = t_{гр.п} - t_{в.п}$$

- корисну різницю температур, яка завжди менше загальної різниці температур на величину температурних втрат (депресій),

$$\Delta t_{н.р} = \Delta t_{общ} - \sum \Delta t_{пот}$$

- температурні втрати (депресії), які складаються з температурної, гідростатичної і гідравлічної депресій,

- температурну депресію  $\Delta t_{m.д}$ - різницю між температурами кипіння розчину і чистого розчинник;

- гідростатичну депресію  $\Delta t_{с.д}$ - підвищення температури кипіння розчину за рахунок гідростатичного тиску стовпа рідини в трубах випарного апарату;

- гідравлічну депресію  $\Delta t_{г.д}$ - втрати температури вторинної пари, викликані гідравлічними опорами на виході з випарного апарату.

## 2.2 Моделювання процесів випарювання

Процес випарювання широко застосовують в харчовій промисловості в основному для підвищення концентрації розчиненої речовини в розчині. Зазвичай випарюють водні розчини – бурякові, фруктові та овочеві соки, сиропи, барду, кормові дріжджі, пектиновий клей, молоко та ін. Крім того випарювання використовують для виділення розчинених речовин в твердому вигляді, виділенні у чистому вигляді розчинника, поглинання теплоти від охолоджувального середовища та інших цілей [6]. Випарювання проводять в випарних апаратах різного призначення і конструктивного оформлення.

Вибір конструкції і технологічної схеми випарних апаратів визначається особливостями технологічної схеми підприємства, властивостями

випарюваного розчину, призначенням процесу випарювання, традиціями в даному виробництві і т.п. Випарні апарати відрізняються режимними характеристиками, статичними і динамічними властивостями. Робота випарних апаратів технологічно пов'язана з різного роду конденсаторами, теплообмінниками тощо.

Рівень киплячого розчину  $h$  над нижнім перетином поверхні розчину вище п'єзометричного рівня  $h_p$  некиплячої рідини в сокомірному склі апарату в наслідок різниці густини парорідкісної емульсії та розчину, так як густина киплячої емульсії менше густини розчину.

Незалежно від конструкції і призначення кожен випарної апарат характеризується наступними вхідними параметрами: витратою рідини, що випаровується  $S_n$  та її початкової концентрацією  $b_n$ , теплоємністю  $c_n$ , та густиною  $\rho_n$ , витратою пари, що гріє  $D_n$  і її температурою  $t_n$  або ентальпією  $i_n$ , теплоємністю  $c_n$ , густиною  $\rho_n$ . Ці параметри, що характеризують вхідні потоки, можуть бути керуючими. Процес випарювання визначається і конструктивними параметрами: масою металу корпусу  $G_m$ , площею поверхні нагріву  $F$ , об'ємом апарату  $V$ , масою ізоляції  $G$ . [6]

Вихіднимим параметрами є витрата концентрованого розчину  $S_k$  та його концентрація  $b_k$ , густина  $\rho_k$  та теплоємність  $c_k$ , рівень киплячої рідини  $h$ , витрата конденсату  $D_k$  та його температура  $t_k$ , витрата вторинної пари  $W$  і витрата пару на відвід неконденсованих газів  $D'$ .

Внутрішніми параметрами можуть бути маса пару в апараті або гріючій камері  $G_n$ , маса конденсату  $G_k$ , температура киплячої рідини  $t_{жк}$ , внутрішня енергія рідини або окремих частин апарату  $u$ , їх температури  $t$ , тиск в апараті  $p$  та інше.

Основні рівняння, зв'язуючі вхідні та вихідні характеристики процесу випарювання, наступні:

- а) рівняння матеріального балансу випарюваного розчину

$$S_n = S_k + W; \quad (5)$$

- б) рівняння балансу сухих речовин

$$S_{\text{н}}CB_{\text{н}} = S_{\text{к}}CB_{\text{к}} \quad (6)$$

в) рівняння теплового балансу

$$S_{\text{н}}ct_{\text{н}} + Q_{\text{п}} = Wi + S_{\text{к}}c_{\text{к}}t_{\text{к}} + Q_{\text{пот}} \quad (7)$$

або

$$Q_{\text{п}} = W(i - c_{\text{в}}t_{\text{к}}) + S_{\text{к}}c_{\text{к}}t_{\text{к}} - S_{\text{н}}c_{\text{п}}t_{\text{п}} + Q_{\text{пот}}$$

г) рівняння для визначення витрати гріючого пару

$$D = W \frac{i - c_{\text{в}}t_{\text{к}}}{i'' - i'} + S_{\text{н}}c_{\text{в}} \frac{t_{\text{к}} - t_{\text{н}}}{i'' - i'} + \frac{Q_{\text{п}}}{i'' - i'}$$

де  $c_{\text{в}}$  – теплоємність води;  $Q_{\text{п}}$  – теплоємність пару;  $Q_{\text{пот}}$  – втрати теплоти;  $i$ ,  $i'$ ,  $i''$  – ентальпії вторинної пари, конденсата та ріючої пари.

Основною технологічною метою процесу випарювання в харчових виробництвах є забезпечення заданої концентрації випарює розчину. Наприклад, концентрація випарює дифузійного соку цукрових заводів після багатокорпусної установки повинна бути 65% СВЯ. Основна узагальнена оцінка процесу випарювання - це питомі витрати на випарювання 1 м \* води. Приватними оцінками є питомі витрати або витрати пари, теплової або електричної енергії, капітальні, експлуатаційні або інші витрати, які характеризують окремі сторони цього складного процесу. [6]

Узагальнений критерій техніко-економічної ефективності процесу випарювання є вираз:

$$Z_p = C_Q Q_T + C_{\text{ел}} Q_{\text{ел}} + (1,56p_{\text{в}} + p_{\text{н}})(C_F F + K_{\text{уд}}) \mathcal{E}_{\text{пр}}$$

де  $Z_p$  – розрахункові затрати на випарювання 1 м<sup>3</sup> води;  $C_Q$ ,  $C_F$ ,  $C_{\text{ел}}$  – ціна теплоти, поверхні нагріву та електроенергії;  $Q_T$ ,  $Q_{\text{ел}}$  – витрата теплоти та електроенергії;  $p_{\text{в}} + p_{\text{н}}$  – надлишковий тиск в парорідинному просторі;  $F$  – величина площі поверхні нагріву;  $K_{\text{уд}}$  – питомі приведені капітальні затрати;  $\mathcal{E}_{\text{пр}}$  – приведені експлуатаційні витрати.

При процесі випарювання значно змінюються расход н характеристики випарює розчину, витрати тиск вторинної пари. Ці зміни характеризуються періодичними збуреннями безперервної дії (від споживачів), а також впливами

при аварійних ситуаціях. Внутрішні обурення визначаються зміною термічного опору через утворення накипу, властивостей розчину в процесі випарювання, а також накопиченням неконденсуючихся газів і інших неконтрольованих впливів.

Найважливішими завданнями управління випарювання є забезпечення на виході розчину заданої концентрації і забезпечення теплових споживачів паром з заданими характеристиками. Окремими завданнями управління можуть бути стабілізація рівня в апаратах, вакууму в концентраторі, отримання необхідного кольору розчину і т.д. Кінцева мета управління – забезпечення мінімальних витрат на процес випарювання, тобто Мінімальних значень техніко-економічних критеріїв.

### 2.3 Модель технологічного розрахунку режимів випарювання

Моделювання процесу випарювання в харчових виробництвах має особливості, пов'язані з властивостями випарюваних розчинів. Наприклад, при випаровуванні дифузійного соку цукрового виробництва у вторинному парі застосовуються інертні гази, що складаються в основному з вуглекислого газу, аміаку і всіх компонентів повітря, помітно впливають на технологічні режими процесу випарювання.

Утворення аміаку і вуглекислого газу пов'язане з тим, що дифузійний сік до випарювання піддається дефекації (обробка  $\text{CaO}$ ). сатурації (обробка  $\text{CO}_2$ ) і сульфітації (обробка  $\text{SO}_2$ ). В результаті цієї обробки утворюються аміак і вуглекислий газ. Кількість аміаку визначається вмістом в буряках аміачного і амідного азоту, а кількість вуглекислого газу - окислів калію і натрію  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ , які при сатурації окислюються до бікарбонатів. Кількість потрапляє у вторинний пар повітря визначається режимами роботи випарної установки. За відомим концентраціям цих компонентів в соку можна розрахувати частку інертних газів  $G_{ин}$  у вторинному парі.

На перших щаблях деяких випарних установок застосовуються прямоточні апарати, що працюють практично без циркуляції і забезпечують найменші втрати цукру.

Сульфітований сік надходить під нижню трубну решітку апарату, проходить через трубки, де закипає за рахунок тепла, що підводиться гріючою парою. Після виходу з труб частина води з соку випаровується і разом з газами розкладання йде через надсоковий простір апарату. При цьому частково розкладається цукор. З урахуванням цих особливостей зв'язку між вхідними та вихідними параметрами випарного апарату в статисти можна наближено описати системою рівнянь [6].

$$S_{\text{н}} = S_{\text{к}} + W;$$

$$S_{\text{н}} c_{\text{н}} t_{\text{н}} + Q = S_{\text{к}} c_{\text{к}} t_{\text{к}} + W i;$$

$$W^D = \frac{18 P_W}{P - P_W} G_{\text{ин}}; \quad (8)$$

$$t_{\text{к}} = \frac{\Psi_2(CB_{\text{к}})}{(g P_W - \Psi_1(CB_{\text{к}}))} + \frac{G_{\text{к}}^{\text{нec}}}{G_{\text{к}}^{\text{вод}}} (6,81 - 0,056 CB_{\text{к}}) - c; \quad (9)$$

де,  $P_W$  – парціальний тиск вторинної пари, яке визначається відношенням

$$\lg P_W = \Psi_1(CB_{\text{к}}) + \frac{\Psi_2(CB_{\text{к}})}{C t_{\text{к}}};$$

$\Psi_1(CB_{\text{к}})$ ,  $\Psi_2(CB_{\text{к}})$  – величини, що залежать від масової концентрації сухих речовин на виході з апарату ( $CB_{\text{к}}$ );  $C$  – стала;  $t_{\text{к}}$  – температура кипіння соку, °C;  $G_{\text{ин}}$  – молярна витрата інертних газів, кмоль/год;  $G_{\text{н}}^{\text{нec}}$ ,  $G_{\text{н}}^{\text{сах}}$  – витрата несахарів та води на виході з апарату;  $P$  – тиск в апараті;  $Q$  – теплота, що підводиться в апарат з гріючою парою.

Наведена система складається з рівнянь матеріального і теплового балансів апарату, закону Дальтона (9) і рівняння для визначення температури соку на виході з апарату  $t_{\text{к}}$ , отриманого з урахуванням поправки на його якість.

Система з чотирьох рівнянь містить чотири невідомі величини ( $S_{\text{к}}$ ,  $W$ ,  $t_{\text{к}}$ ,  $t_{\text{н}}$ ), тобто при відомих вихідних даних дозволяє однозначно визначати всі невідомі параметри. Проте ряд величин, які входять в цю систему, визначаються додатковими співвідношеннями.

Витрати розчину, що випарюється на вході і виході залежать від змісту сахарів і несахарів.

$$S_{\text{н}} = G_{\text{н}}^{\text{вод}} + G_{\text{н}}^{\text{сах}} + G_{\text{н}}^{\text{нес}}; \quad (10)$$

$$S_{\text{к}} = G_{\text{к}}^{\text{вод}} + G_{\text{к}}^{\text{сах}} + G_{\text{к}}^{\text{нес}}; \quad (11)$$

Теплоємність розчину, що випарюється на вході та виході пов'язана із вмістом сухих речовин та доброякісністю.

$$c = 1 - b[0,6 - 0,0018t + 0,0011(100 - D6)]; \quad (12)$$

Доброякісність, в свою чергу, визначається відношенням

$$D6 = \frac{100G}{G^{\text{сах}} + G^{\text{сах}}}$$

а доля сухих речовин

$$b_1 = G^{\text{сах}} + G^{\text{сах}}$$

або масова концентрація

$$CB = \frac{100(G^{\text{сах}} + G^{\text{сах}})}{s}$$

Густина розчину

$$\rho = 1011,8 + 3,4CB + 0,02CB^2 - (0,4 + 0,0025CB) \cdot (t - 20); \quad (13).$$

Ентальпія вторинної пари ів складається з енергії, затраченої на нагрівання рідини до температури  $t_W$  та випарування  $i_W = i_g - i_n$

$$\begin{cases} i_{\text{в}} = 0,99615t_W + 1,8239 \cdot 10^{-6}t_W^2 - 0,13468 \cdot 10^{-0,036t_W} + 0,1346 \\ i_{\text{н}} = 597,34 - 0,5550t_W - 0,2389 \cdot 10x = 5,1463 - \frac{1540}{T_W} \end{cases} \quad (14)$$

де  $x$  – вологовміст повітря.

Тиск в парорідинному просторі визначаємо з рівняння

$$\begin{aligned} \lg P_W = 0.0141966 - 3.142305 \left( \frac{10^3}{T_W} - \frac{10^3}{373,15} \right) + \\ + 8,21 \cdot \lg \left( \frac{373,15}{T_W} \right) - 0,0024804(373,15 - T_W); \end{aligned} \quad (15)$$

де  $T_W = t_w + 273,15 \text{ K}$ .

$$G_{\text{ин}} = \frac{G_{NH_3}}{17} + \frac{G_{CO_2}}{44} + \frac{G_{\text{вод}}}{29,8}; \quad (16)$$

$$G_K^{сах} = G_H^{сах} + G_{разл}; \quad (17)$$

$$G_K^{нес} = G_H^{нес} + G_{разл}; \quad (18)$$

$$G_{разл} = G_H^{сах}(1 - e^{k\tau}); \quad (19)$$

де константа розкладання сахарів  $k$  та час випарювання  $\tau$

Середнє значення температури випарюваного розчину та кислотність визначаються співвідношеннями

$$T_{ср} = t_{ср} + 273.15, \quad \text{де } t_{ср} = \frac{t_H + t_K}{2}; \quad (20)$$

$$pH_{ср} = pH_H - 0,0175(t_{ср} - 25); \quad (21)$$

Постійна  $C$  при даних умовах дорівнює 230, функції  $\Psi_l(CB_K)$  в залежності від меж масової долі сухих речовин в розчині на виході із апарату мають конкретний вид при  $CB_K < 40\%$

$$\begin{aligned} \Psi_1^I(CB_K) &= 7,48 + 0,025 \cdot CB_K; \\ \Psi_2^I(CB_K) &= -1411 - 10,67 \cdot CB_K \quad \text{при } 40\% \leq CB_K \leq 75\%; \\ \Psi_1^{II}(CB_K) &= 9,51 - 0,0254 \cdot CB_K; \\ \Psi_2^{II}(CB_K) &= -2104 + 6,66 \cdot CB_K \quad \text{при } CB_K > 75\%; \\ \Psi_1^{III}(CB_K) &= 0,73 + 0,01916 \cdot CB_K; \\ \Psi_2^{III}(CB_K) &= 540 - 28,6 \cdot CB_K \end{aligned} \quad (22)$$

Для конкретних умов харчового підприємства системи чотирьох рівнянь (5), (7), (8), (9) недостатньо, щоб описати зв'язки між характеристиками процесу. У зв'язку з цим система повинна бути доповнена рівняннями (10, 22). З огляду на, що невідомі величини входять в ці додаткові рівняння нелінійно, виникають значні труднощі при вирішенні розширеної системи рівнянь[6].



Для вирішення цієї системи рівнянь застосували метод послідовних наближень. Температура вторинної пари дозволяє визначити кількість вторинної пари, використовуючи її залежність від тиску. Правильність підбору температури вторинної пари контролюється рівністю кількості водяної пари з закону Дальтона (8) за допомогою рівняння, отриманого спільним рішенням рівнянь матеріального і теплового балансів апарату

$$W^T = \frac{Q_{пр} - S_k c_k t_k}{i_w - c_k t_k} \quad (23)$$

$$Q_{пр} = S_n c_n t_n + Q_n \quad (24)$$

де  $Q_n$  – кількість тепла, що підводиться гріючою парою.

Розрахунок виконується в наступному порядку:

1. Спочатку вводять вихідні дані, що характеризують властивості розчину, що надходить в апарат: витрата  $S_n$ , склад  $G_n^{вод}$  (масова частка води в соку);  $G_n^{сах}$  (масова частка сахарів); і  $G_n^{нес}$  (масова частка несахарів); температура  $t_n$ , масова концентрація  $CB_n$  і частка  $b_n$  сухих речовин; доброякісність  $Db_n$  і кислотність  $pH_n$  при 25 °С, що надходить на випарювання дифузійного соку; потім геометричні розміри апарата і поверхні нагріву; діаметр апарату  $D_{ан}$ ; діаметр труб  $d_{тр}$ , довжина  $l_{тр}$ , число труб  $n$  [6].

Потім вводять або розраховують характеристики: висоту шару рідини над трубною решіткою  $h$ , кількість тепла, що підводиться з парою  $Q_n$  та тиск в апараті  $P$ .

2. Розраховують всі величини, які в процесі подальших розрахунків не змінюються  $G_{ин}$  (16), теплоємність  $c$  (12), густину  $\rho$  розчину, кількість енергії, що підводиться  $Q_{пр}$  (24).

3. Приймавши в першому наближенні  $i = 1$ ) деяке числове значення величини  $t^w$ , визначають кількість водяної пари відповідно до закону Дальтона  $W^D$  (8), для чого знаходять  $P^w$  по (15).

4. Розраховують витрату вторинної пари  $W^T$  по (23). Розрахунки проводять у такій послідовності-

- а) знаходять  $S_k$  (5),  $CB_k$  (6),  $\Psi_1(CB_k)$  і  $\Psi_2(CB_k)$  (22);

б) прийнявши  $G_n^{сах} + G_n^{нес} = G_k^{сах} + G_k^{нес}$ , знаходять  $G_k^{вод}$  (11); прийнявши  $G_n^{сах} = G_k^{сах}$ , знаходять  $t_k$  (9);

в) визначають  $t_{cp}$  і  $T_{cp}$  (20), густину  $\rho_{ж}$  (13), час виконання  $\tau$ , кислотність  $pH_{cp}$  (21), константу розкладання цукрів  $k$ , кількість сахарів, що розклалися  $G_{раз}$ ,  $G_n^{нес}$  (19), концентрації сахарів і несахарів на виході  $G_k^{сах}$  (17) та (18); доброякісність  $Dб$ , теплоємність  $c$  (19):

г) розраховують температуру вторинної пари  $T^W$  (16); її ентальпію  $i_W$  (14); витрату  $W^*$  (193).

5. Порівнюють величини  $W^D$  і  $W^T$ . Якщо вони значно відрізняються, то повторюють розрахунок, починаючи з п. 3, в такій же послідовності до тих пір, поки не буде досягнута задана точність розрахунку.

## 2.4 Висновки

1. Математичні моделі випарних установок використовують для встановлення зв'язків між вхідними та вихідними параметрами, визначення режимів роботи існуючих установок і конструктивних параметрів проєктованих. Крім того, математичне моделювання широко використовують для визначення динамічних характеристик МВУ. Це дозволяє значно скоротити витрати на вибір і обґрунтування режимних і конструктивних параметрів і системи управління випарювання.

2. Моделювання процесів випарювання має досить трудомісткий розрахунок, тому доцільно проводити його на ЕОМ за допомогою алгоритму розрахунку технологічних режимів випарного апарату.

### 3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИПАРНОГО АПАРАТУ З ВИНОСНОЮ ГРІЮЧОЮ КАМЕРОЮ

Основною задачею комп'ютерного моделювання була побудова 3D моделі випарного апарату з виносною гріючою камерою та розрахунок на міцність та стійкість його ключових елементів таких як еліптична кришка сепаратору і гріючої камери, корпус гріючої камери, царга та опора сепаратора.

Для виконання побудови 3D моделі випарного апарату з виносною гріючою камерою застосовувалось програмне забезпечення SolidWorks, також за допомогою даного програмного забезпечення проводились розрахунки на міцність та стійкість.

Дані розрахунки базувалися на методі скінченних елементів (МСЕ), що в даний час є стандартом при вирішенні задач механіки твердого тіла за допомогою чисельних алгоритмів.

#### 3.1 Основи методу скінчених елементів

Популярний свого часу метод кінцевих різниць, а також претендував на універсальність метод граничних елементів (граничних інтегральних рівнянь) зараз займають досить вузькі ніші, обмежені дослідними або спеціальними завданнями. МСЕ зайняв лідируючі положення завдяки можливості моделювати широке коло об'єктів і явищ. Абсолютна більшість конструктивних елементів, вузлів і конструкцій, виготовлених з найрізноманітніших матеріалів, що мають різну природу, можуть бути розраховані за допомогою МСЕ. При цьому, зрозуміло, потрібно враховувати неминучі при будь-чисельної апроксимації умовності і похибки. Тому питання відповідності між розрахунковою моделлю і реальністю є, мабуть, основним при використанні програм аналізу. Незважаючи на те, що такі програми мають більш-менш докладну документацію, вони все одно залишаються певною мірою чорними ящиками. Це означає певну непередбачуваність результатів, а також деякий свавілля в їх інтерпретації. Отже, якість висновків, прийнятих на основі

результатів, цілком залежить від кваліфікації, а також, стосовно розрахунку на міцність, принципового знайомства з основами МСЕ [7].

Метод скінченних елементів є чисельним методом вирішення диференціальних рівнянь, що зустрічаються у фізиці і техніці. Виникнення цього методу пов'язане з вирішенням завдань космічних досліджень (1950 г.). Вперше він був опублікований в роботі Тернера, Клуза, Мартіна і топпа. Ця робота сприяла появі інших робіт; був опублікований ряд статей з застосуваннями методу скінченних елементів до завдань будівельної механіки і механіки суцільних середовищ. Важливий внесок у теоретичну розробку методу зробив в 1963 р Меллош, який показав, що метод кінцевих елементів можна розглядати як один з варіантів добре відомого методу Релея-Рітца. У будівельній механіці метод кінцевих елементів мінімізацією потенційної енергії дозволяє звести задачу до системи лінійних рівнянь рівноваги.

Зв'язок методу скінченних елементів з процедурою мінімізації привела до широкого використання його при вирішенні задач в інших областях техніки. Метод застосовувався до завдань, описуваних рівняннями Лапласа або Пуассона. Рішення цих рівнянь також пов'язано з мінімізацією деякого функціоналу. У перших публікаціях за допомогою методу скінченних елементів вирішувалися завдання поширення тепла. Потім метод був застосований до завдань гідромеханіки, зокрема до задачі течії рідини в пористому середовищі.

Область застосування методу скінченних елементів істотно розширилася, коли було показано, що рівняння, що визначають елементи в задачах будівельної механіки, поширення тепла, гідромеханіки, можуть бути легко отримані за допомогою таких варіантів методу зважених нев'язок, як метод Галєрюша або спосіб найменших квадратів.

Метод кінцевих елементів з чисельної процедури рішення задач будівельної механіки перетворився в загальний метод чисельного рішення диференціального рівняння або системи диференціальних рівнянь

### 3.1 Побудова 3D моделі та конструктивний розрахунок

Метою розрахунку є визначення товщини стінок конструктивних елементів та їх перевірка на міцність.

Так як даний апарат може застосовуватись в різних галузях та при різних режимах роботи, при проектуванні необхідно задаватися певним запасом міцності.

В пакеті Solidworks була спроектована конструкція випарного апарату з виносною гріючою камерою з використанням реальних фізичних властивостей матеріалів, було проведено дослідження конструктивних елементів на міцність та стійкість.

3D модель будувалась з дотриманням реальних габаритних розмірів та максимального деталювання усіх елементів та частин. Для проведення конструктивного розрахунку використовувались реальні параметри матеріалів з яких побудована конструкція, данні про процеси, що відбуваються всередині апарату.

Дана модель побудована таким чином, щоб можна було максимально точно зобразити параметри роботи даного апарату і усі новантаження, що отримує конструкція при реальній експлуатації.

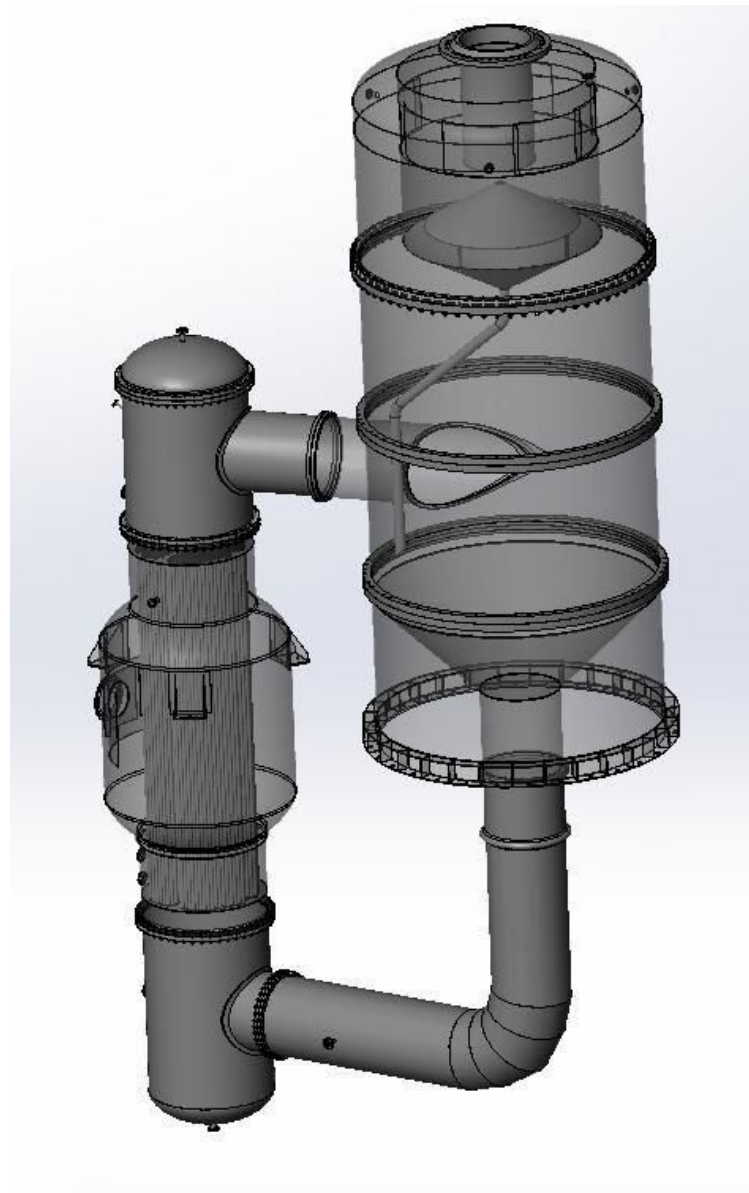


Рис. 3.1 – 3D модель випарного апарату з виносною гріючою камерою

### Вихідні дані для розрахунку на міцність та стійкість

#### 1. Тиск, МПа:

у сепараторі	0,08
у міжтрубному просторі	0,4
у трубному просторі	0,1

#### 2. Температура, С°:

у сепараторі	94
у міжтрубному просторі	144
у трубному просторі	102

3. Маса, кг:

15000

4. Корпус апарату та деталі, що контактують з розчином, який упарюється виготовляти із сталі 1Х21Н5Т ГОСТ 5632-72;  
опори - зі сталі 45Х ГОСТ 4543-71,  
інші деталі - зі сталі 3 ДСТУ 2651:2005.

Розглянемо розрахунки на міцність та стійкість ключових елементів таких як еліптична кришка сепаратору і гріючої камери, корпус гріючої камери, царга та опора сепаратора.

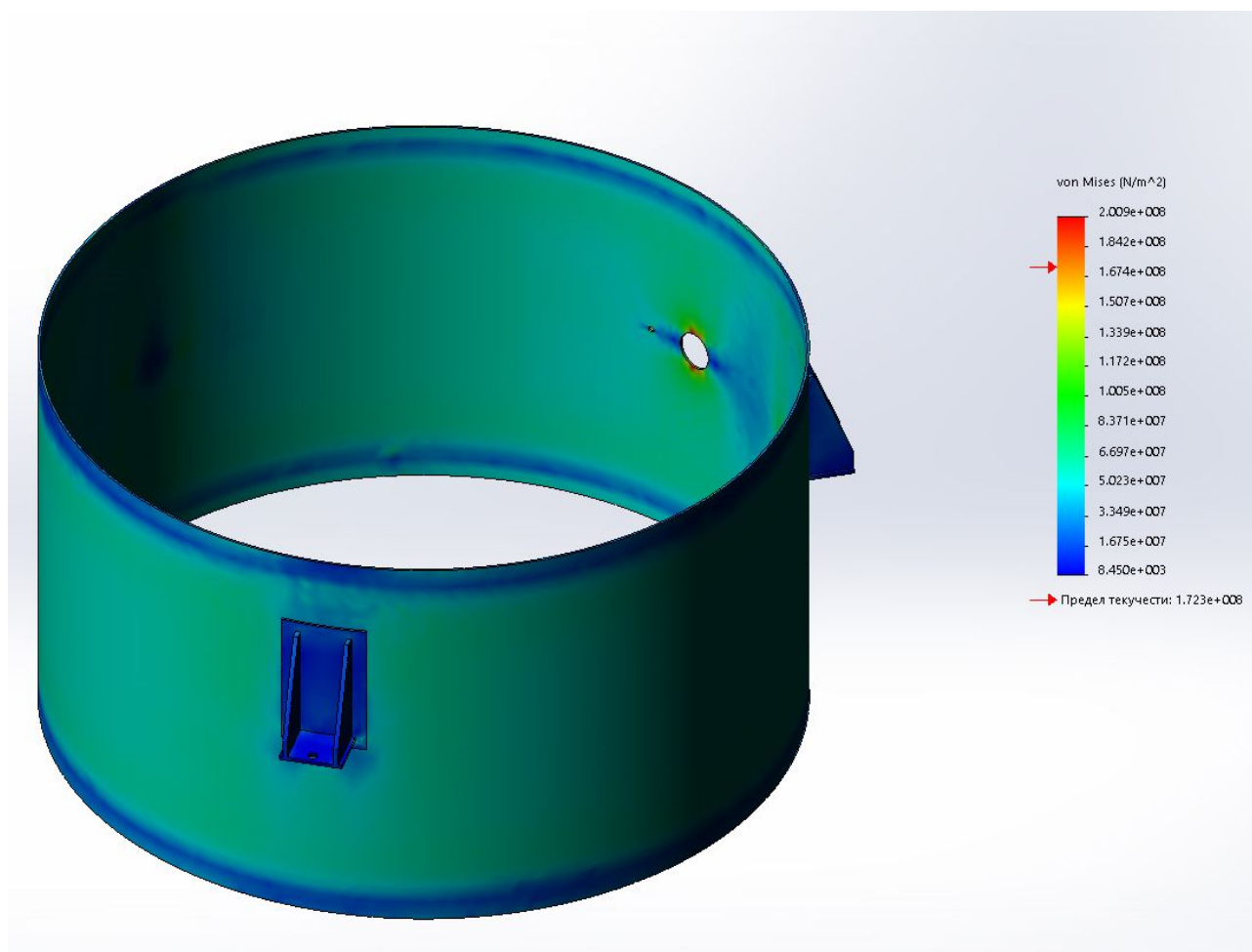


Рис. 3.2 – Верхня царга сепаратора, епюра напружень.



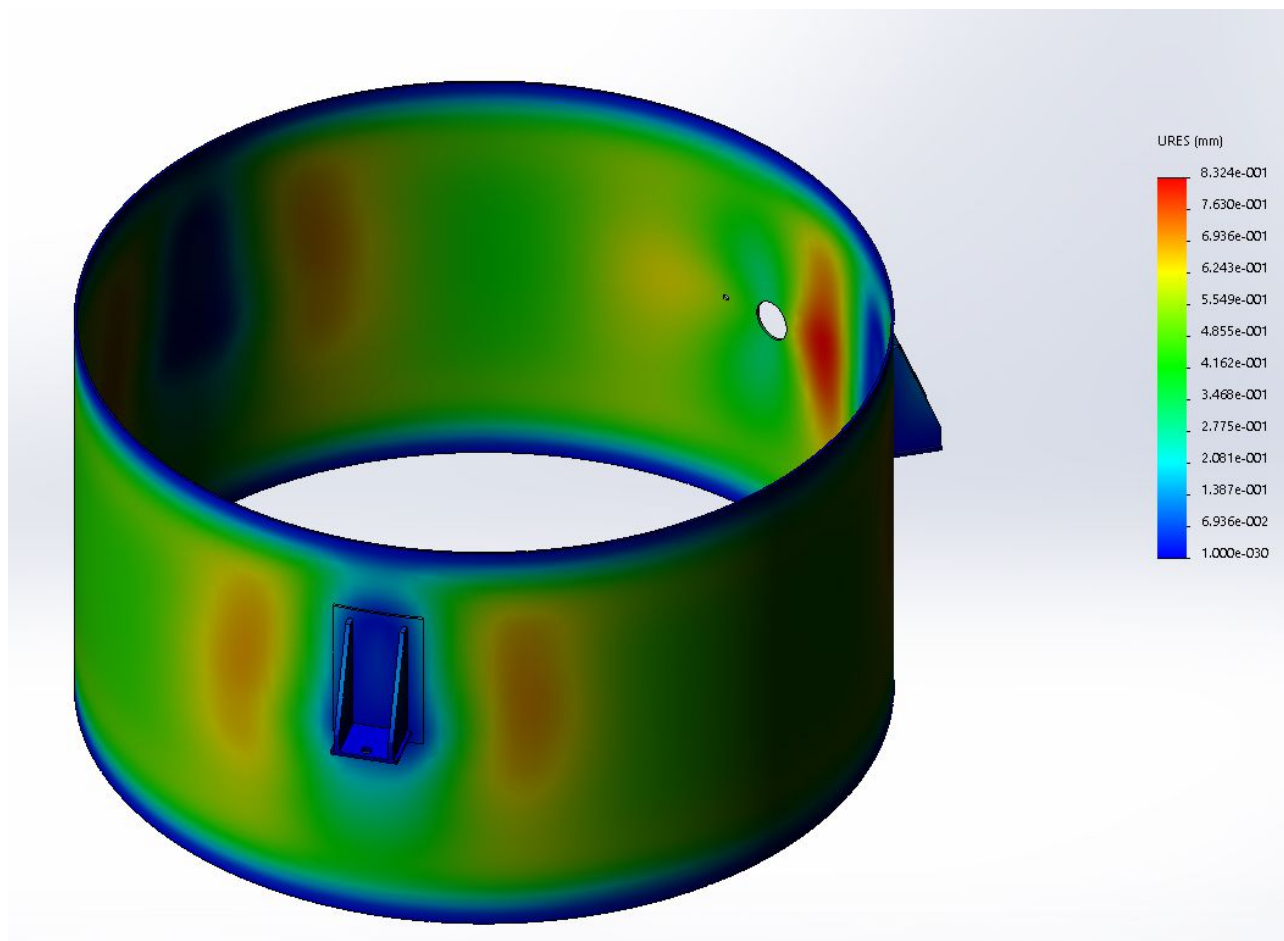


Рис. 3.3. – Верхня царга сепаратора, епюра деформацій.

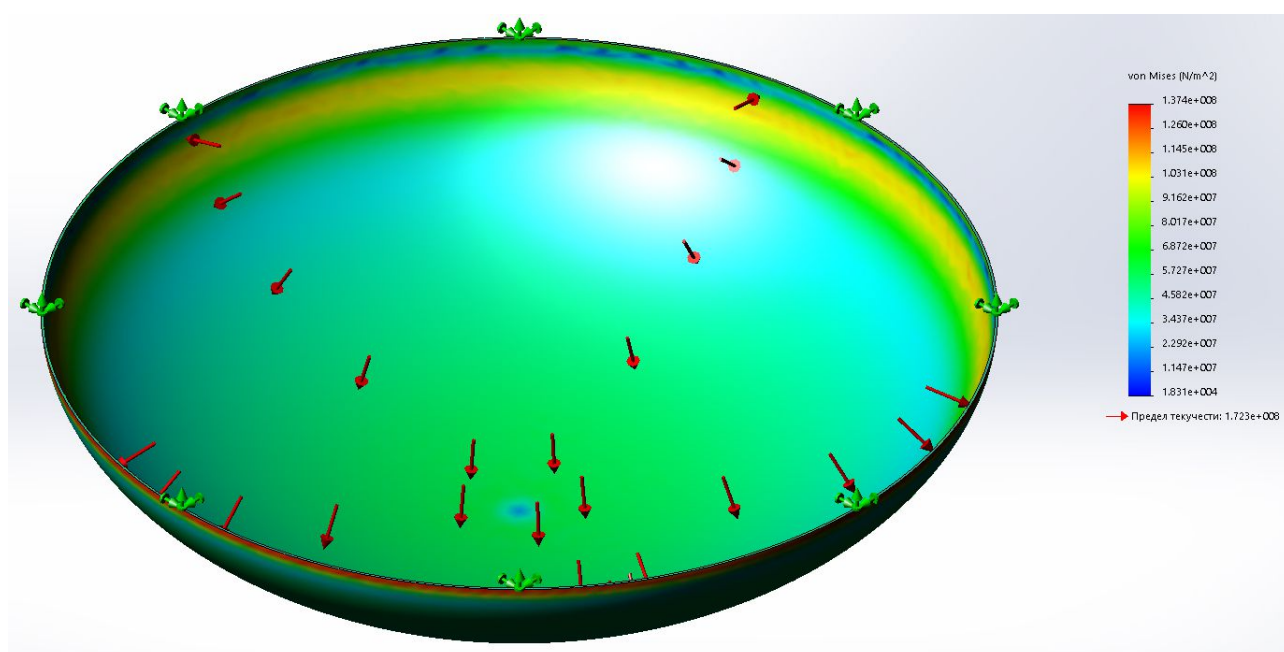


Рис. 3.4 – Еліптична кришка гріючої камери, епюра напружень.

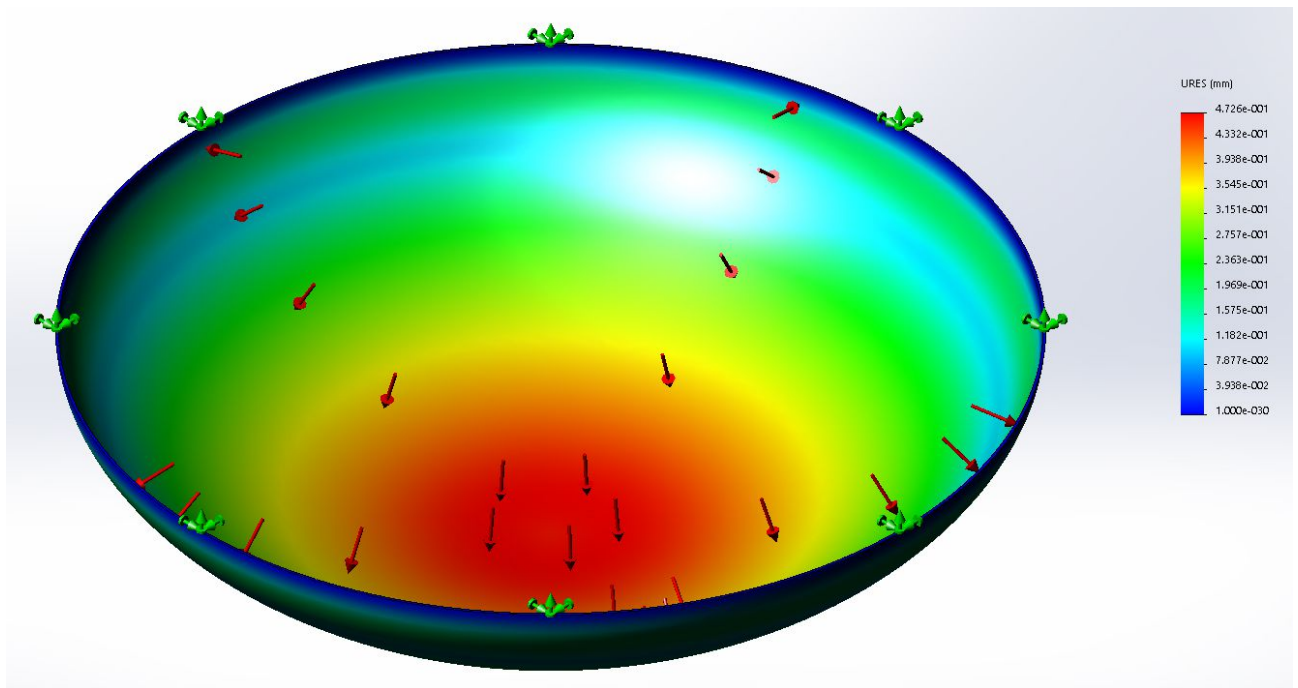


Рис. 3.5 – Еліптична кришка грючої камери, епюра деформацій.

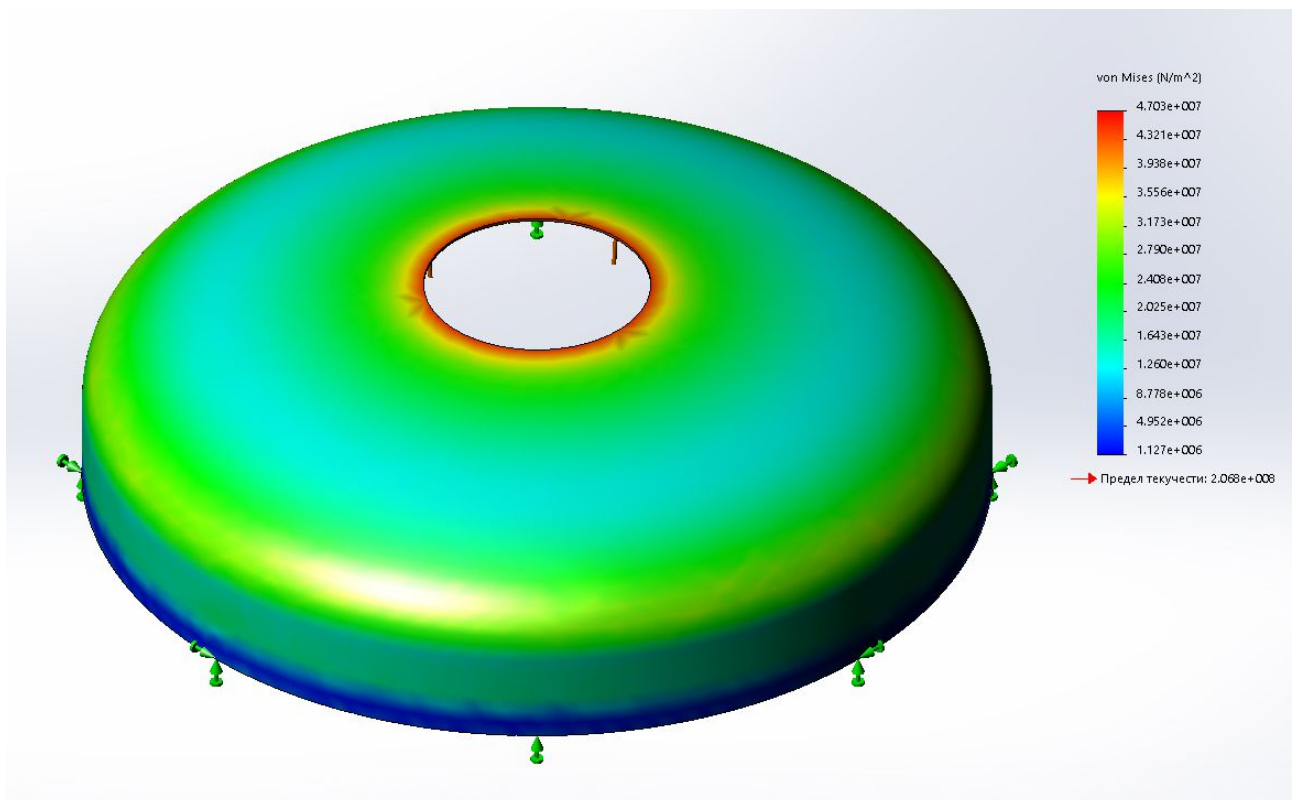


Рис. 3.6 – Еліптична кришка сепаратора, епюра напружень.

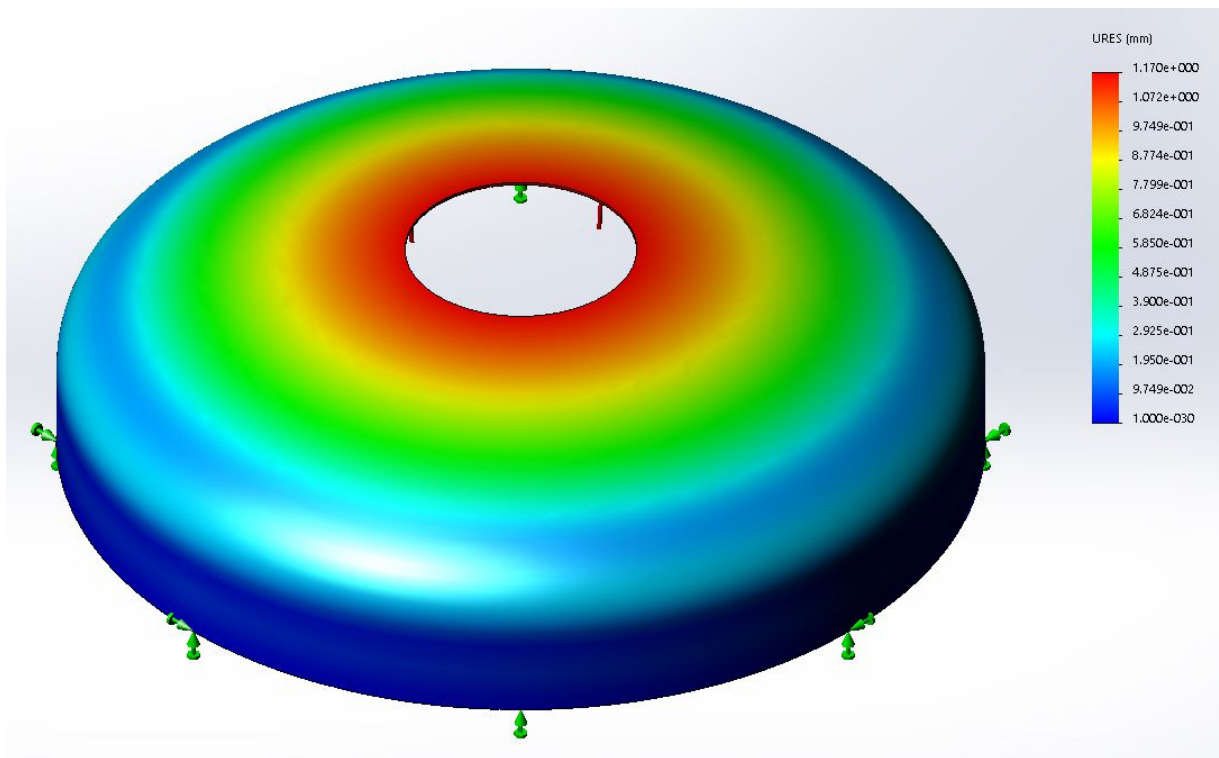


Рис. 3.7 – Еліптична кришка сепаратора, епюра деформацій

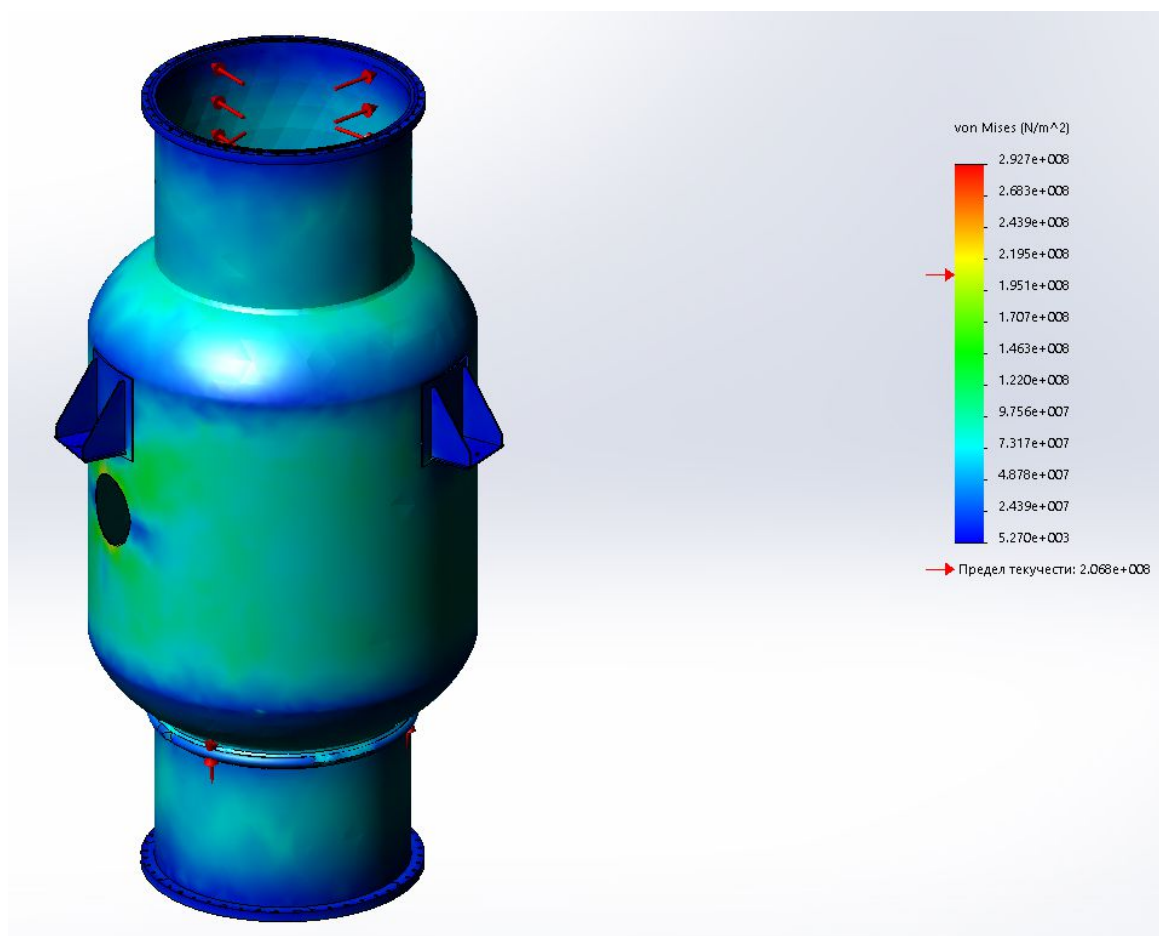


Рис. 3.8 – Корпус грійучої камери, епюра напружень.

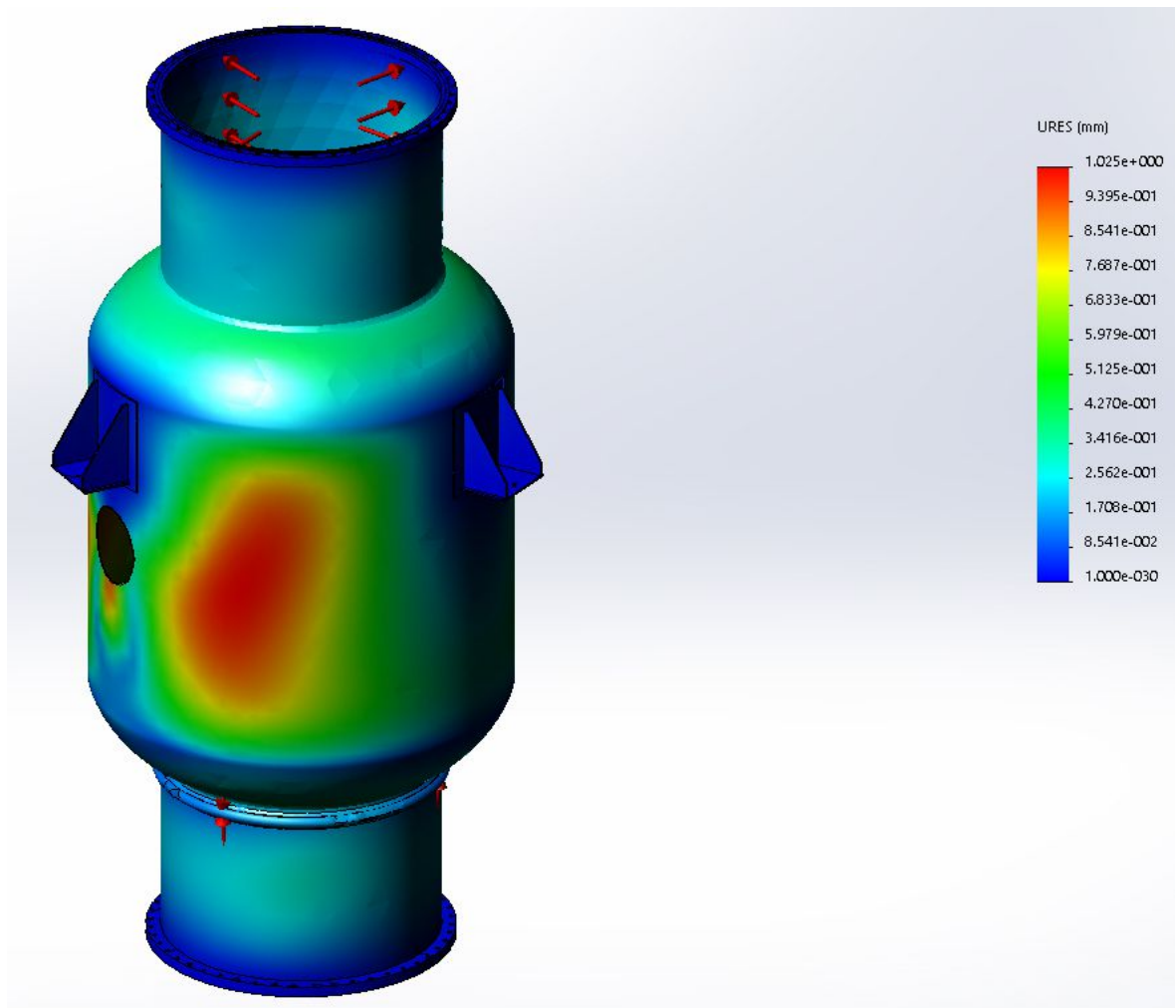


Рис. 3.9 – Корпус гріючої камери, епюра деформацій

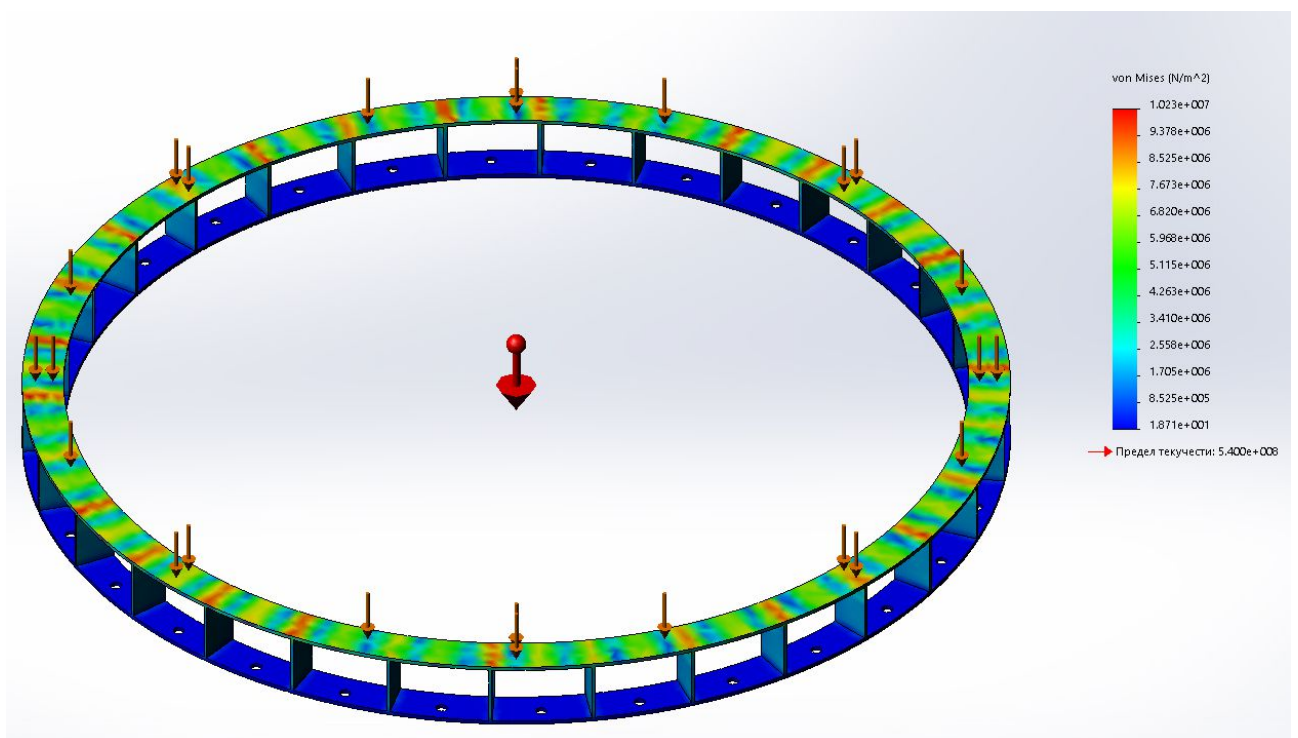


Рис. 3.10 – Опора сепаратора, епюра напружень



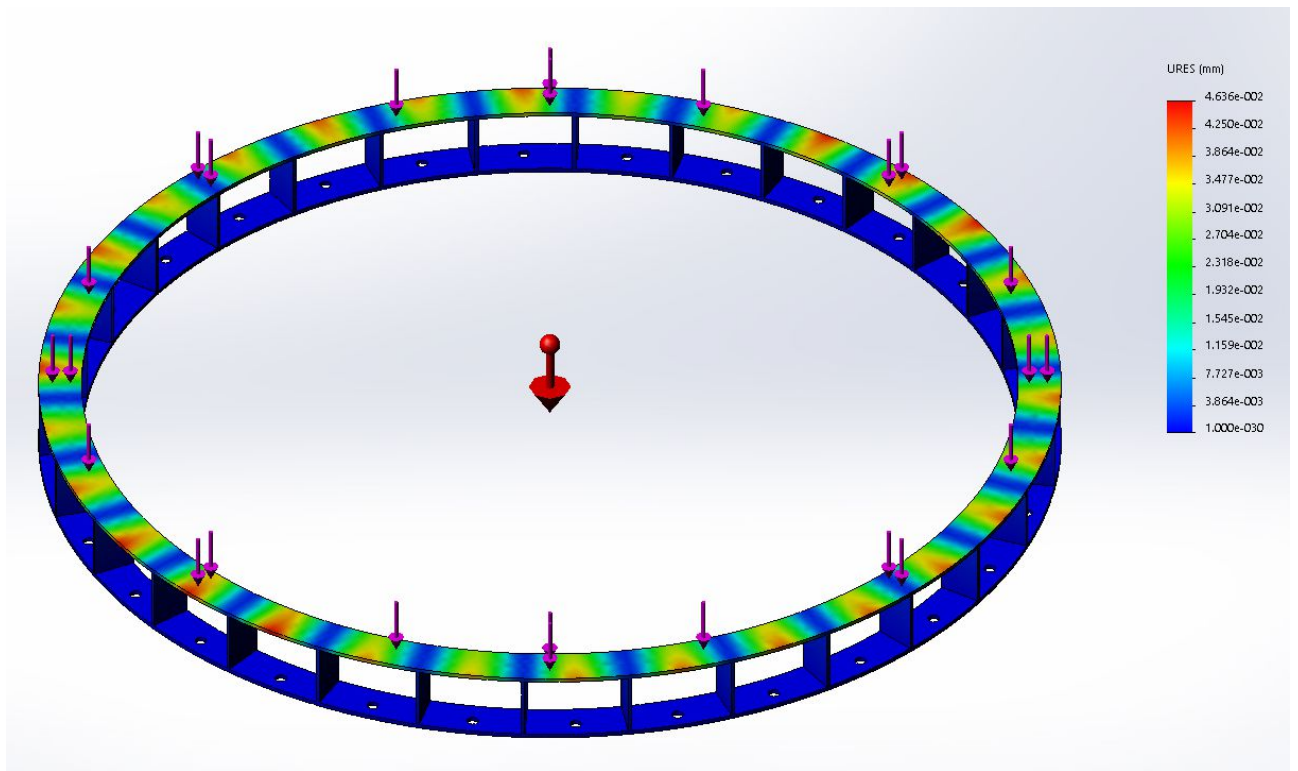


Рис. 3.11 – Опора сепаратора, епюра деформацій

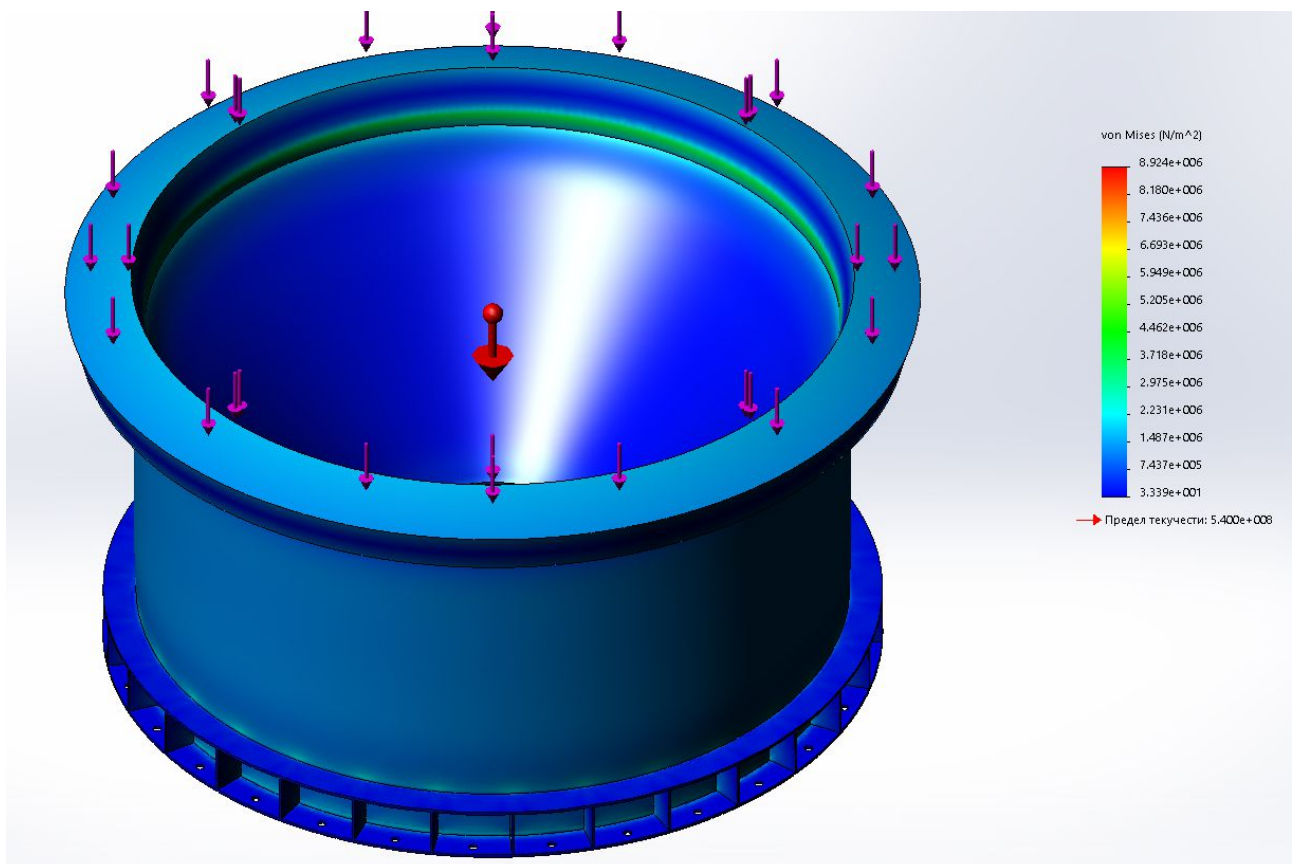


Рис. 3.12 – Опора сепаратора у зварному з'єднанні з днищем сепаратора , епюра напружень

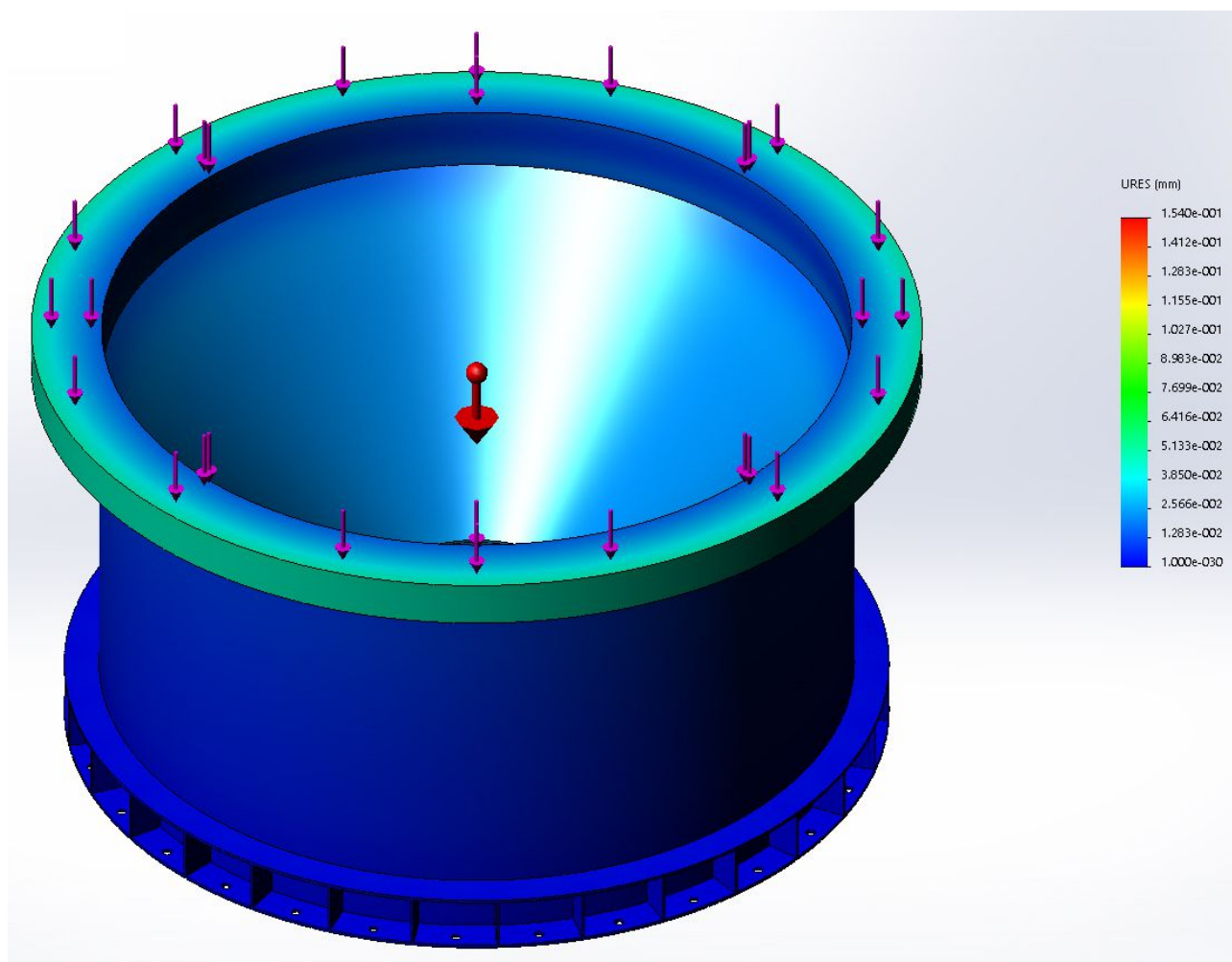


Рис. 3.13 – Опора сепаратора у зварному з'єднанні з днищем сепаратора , епюра деформацій

На Рис. 3.2 зображена епюра напружень верхньої царги сепаратора. Максимальне напруження конструктивного елемента досягається в синіх зонах і становить  $0,023 \cdot 10^{-7} \text{Па}$ , але також існує точка на елементі, напруження якої досягає червоної зони і становить,  $1,842 \cdot 10^{-8} \text{Па}$ . Дана точка не є проблемою, так як відноситься до периметру отвору у якому розташовується герметичний оглядовий люк, при встановленні якого утворює додаткове цільце жорсткості для даного отвору, тим самим зменшує на нього навантаження до максимально малого значення.

На Рис. 3.3 зображена епюра деформацій верхньої царги сепаратора. Максимальна деформація конструктивного елемента досягається в червоних зонах і становить  $7,63 \cdot 10^{-1}$  мм.

На Рис. 3.4 зображена епюра напружень еліптичної кришки гріючої камери. Максимальне напруження конструктивного елемента досягається в жовтих зонах і становить  $1,031 \cdot 10^{-8}$  Па.

На Рис. 3.5 зображена епюра деформацій еліптичної кришки гріючої камери. Максимальна деформація конструктивного елемента досягається в червоних зонах і становить  $4,726 \cdot 10^{-1}$  мм.

На Рис. 3.6 зображена епюра напружень еліптичної кришки сепаратора. Максимальне напруження конструктивного елемента досягається в помаранчевій зоні і становить  $3,938 \cdot 10^{-7}$  Па.

На Рис. 3.7 зображена епюра деформацій еліптичної кришки сепаратора. Максимальна деформація конструктивного елемента досягається в червоних зонах і становить  $11,70 \cdot 10^{-1}$  мм.

На Рис. 3.8 зображена епюра напружень корпусу гріючої камери. Максимальне напруження конструктивного елемента досягається в блакитних зонах і становить  $7,317 \cdot 10^{-7}$  Па.

На Рис. 3.9 зображена епюра деформацій корпусу гріючої камери. Максимальна деформація конструктивного елемента досягається в червоних зонах і становить  $10,25 \cdot 10^{-1}$  мм.

На Рис. 3.10 зображена епюра напружень опора сепаратора. Максимальне напруження конструктивного елемента досягається в червоних зонах і становить  $1,023 \cdot 10^{-7}$  Па.

На Рис. 3.11 зображена епюра деформацій опора сепаратора. Максимальна деформація конструктивного елемента досягається в помаранчевій зоні і становить  $4,250 \cdot 10^{-2}$  мм.

На Рис. 3.12 зображена епюра напружень опора сепаратора у зварному з'єднанні з днищем сепаратора. Максимальне напруження конструктивного елемента досягається в зелених зонах і становить  $3,718 \cdot 10^{-6}$  Па.

На Рис. 3.13 зображена епюра деформацій опора сепаратора у зварному з'єднанні з днищем сепаратора. Максимальна деформація конструктивного елемента досягається в блакитній зоні і становить  $3,850 \cdot 10^{-2}$  мм.

### 3.3 Висновки

З отриманих результатів можна побачити, що при заданих навантаженнях втрат міцності немає і деформації конструктивних елементів мінімальні.



## 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

### 4.1 Опис технологічного процесу виробництва лимонної кислоти

Культуральна рідина, що поступає до хімічного цеху на переробку, містить 16-27г/100 мл сухих речовин, з яких 5-12г складають органічні кислоти. Лимонна кислота в їх суміші становить 80-85%. При глибинному способі ферментації з побічних кислот присутні щавлева і глюконова та деякі проміжні. Окрім органічних кислот до складу культуральної рідини входять не використані речовини поживного середовища, з яких 0,2-0,5% припадає на мелясний цукор [2].

Схема установки для виділення кристалізації та сушки лимонної кислоти зображена на рисунку 1. Розглянемо принцип її дії.

На очищення культуральну рідину подають уже відділену від міцелію. Нейтралізують її у реакторі-нейтралізаторі Р1, вапняним молочком, в результаті утворюється цитрат калію. Реактори виготовляють із кислототривкої сталі. Їх об'єм лежить в межах від 6 до 16м<sup>3</sup>, коефіцієнт заповнення реактора рівний 0,5.

До реактора Р1 вапняне молочко подають зі збірника Зб2 переривистим струменем через об'ємно-ваговий дозатор ДЗ при безперервно працюючій мішалці (частота обертання мішалки при нейтралізації – 1,33об/с; при витримуванні – 0,67об/с). Процес нейтралізації ведуть наступним чином:

- культуральну рідину доводять до кипіння;
- додають 90% холодного вапняного молочка, підтримуючи температуру не нижче 90°C;
- доводять рівень рН до 7;
- кип'ятять близько 15 хвилин.

З реактора Р1 суспензія під тиском 0,25МПа потрапляє на фільтрпрес Фб. Фільтрування проводять під тиском 0,9МПа. Фільтрат стікає до відстійника Вд8, і насосом Н9 повертається в реактор Р1 [2].

Осад, що утворився, промивають гарячою водою, а потім підсушують повітрям і збирають у збірник Зб10. З останнього цитрат калію подають на

розкладання до реактора-змішувача Р11. Розкладання проводиться наступним чином:

- цитрат калію розбавляють водою до концентрації сухих речовин 32-33%. Коефіцієнт заповнення – дві треті; температура – 75°C;
- у реактор Р11 зі збірника Зб12 через об'ємно-ваговий дозатор Д14 подають технічну сірчану кислоту, в результаті утворюється лимонна кислота і важкорозчинний гіпс, що випадає в осад. Температура реакційної маси близько 90°C; рівень рН – 1,5;
- через 30-40 хвилин від початку розкладання цитрату калію, при працюючій мішалці, проводять осадження іонів тривалентного заліза розчином десятивідсоткового гексаціанофероату калію, що подається до реактора-змішувача Р11 зі збірника Зб13 через дозатор Д14, протягом 5-8 хвилин [2].

Фільтрування реакційної маси проводять на стрічковому вакуум-фільтрі Ф15 при температурі близько 90°C. Фільтрат збирають у вакуум-збірник Зб16, а потім насосом Н17 перекачують до збірника Зб18. Осад промивають водою, температура якої близька до 90°C. Промивання ведеться до тих пір, доки середня концентрація лимонної кислоти не буде становити 16%.

Далі розчин лимонної кислоти подають на випарювання. Його проводять періодично, у два етапи, у вакуум-випарних апаратах з виносною гріючою камерою. Використовують апарати таких конструкцій тому, що в процесі випарювання утворюється гіпс, який не лише забруднює сам розчини, але і відкладається на поверхні гріючих труб, що зумовлює зниження коефіцієнта теплопередачі.

Перше випарювання проводиться у вакуум-випарному апараті В19 протягом 4-6 годин, при питомій витраті пари 1,1кг на 1кг випареної вологи. Випарювання ведеться, доки густина розчину лимонної кислоти не буде знаходитись в межах 1,26-1,28г/м<sup>3</sup>. Тиск у випарному апараті близько 80кПа. Випарювання ведуть з підливами розчину лимонної кислоти зі збірника Зб18.

Вторинну пару відводять з апарату і конденсують у барометричному конденсаторі К21 [2].

Розчин лимонної кислоти після першого випарювання зливають в реактор з мішалкою Р20, нагрівають до 70°C і додають активоване вугілля в кількості 1,5-2% по об'єму. Суспензію перемішують 30-35 хвилин і фільтрують на дисковому фільтрі Ф23 для відділення вугілля і гіпсу, що утворився при випарюванні. На фільтрування її подають під надлишковим тиском 0,2-0,3МПа.

Фільтрат збирають у збірник Зб24, розбавляють і насосом Н25 перекачують до збірника Зб26, з якого розчин поступає на друге випарювання.

Друге випарювання проводять у вакуум-випарному апараті В27. Тиск у ньому – 80кПа. Концентрування ведеться до тих пір, доки густина розчину не буде становити 1,37-1,38г/м<sup>3</sup> [3].

Після випарювання концентрований розчин зливають у збірник Зб28, з якого він подається на кристалізацію до реактора-кристалізатора Р30. Суть процесу полягає в тому, що розчин лимонної кислоти спочатку охолоджують до 37°C, при швидкості охолодження 20°C/год, далі від 37 до 27°C, зі швидкістю 10°C/год, а потім від 27 до 22°C, із швидкістю 5°C/год. Охолодження проводять до температури 8°C, швидкість кристалізації при цьому становить 3°C/год. При кінцевій температурі кристалізації (8°C) розчин витримують 30 хвилин для «дозрівання» кристалів [2].

Відділення кристалів від маточного розчину ведеться на центрифугі Ц31. Застосовують підвісні центрифуги з нижнім ручним вивантаженням осаду. Роботу ведуть в наступній послідовності:

- центрифугу приводять в рух, і при частоті обертання близько 5об/с з реактора Р30 заливають суспензію кристалів лимонної кислоти;
- частоту обертання ротора збільшують до 16об/с. Відбувається відділення маточного розчину від кристалів лимонної кислоти;
- через 1-1,5 хвилини від початку роботи, коли маточний розчин перестане витікати, кристали промивають водою з температурою 35°C, до повного

освітлення рідини;

- ротор зупиняють, відкривають кришку і вручну вивантажують кристали лимонної кислоти.

Вологість кристалів становить 2-3% [2].

Кристали через елеватор E32 подаються в барабанну сушарку С34. Паралельно з останніми вводять нагріте до 70°C повітря. На виході з сушарки температура повітря становить 35°C.

Висушені кристали охолоджують і елеватором E35 подають на сито Ст36 для просіювання, після якого готовий продукт збирається у збірнику 3637. Зі збірника лимонну кислоту відправляють на фасування і пакування. Дану АТС зображено в Додатку А.

#### 4.2 Обґрунтування вибору конструкції випарного апарату

Концентрування розчину лимонної кислоти, отриманої глибинним способом є досить складним процесом. Складність його полягає в тому, що у процесі випарювання випадає нерозчинний гіпс [2], тому можна використовувати не будь-яку конструкцію випарного апарата.

Для випарювання лимонної кислоти застосовують апарат з природною циркуляцією та виносною гріючою камерою [2, 12, 13].

Цю конструкцію рекомендовано використовувати на даному виробництві тому, що: конструкцію можна швидко розібрати та зібрати [12]; осад можна видаляти механічним способом [2]; має місце легкий доступ до внутрішньої поверхні гріючих труб: забезпечується висока швидкість процесу випарювання [12].

##### 4.2.1 Опис конструкції випарного апарату

Схема випарного апарату з виносною гріючою камерою зображена на рисунку 3.1. Основними його складовими є гріюча камера та сепаратор. Гріюча камера випарного апарату складається з корпусу 1 з'єднаного за

допомогою фланцевого з'єднання з днищем 2 та царгою 3, до якої в свою чергу, приєдніється кришка 4. Сепаратор апарату складається з двох царг 5 і 7, з'єднаних між собою. До нижньої царги прикріплюється днище 6, а до верхньої – кришка 8. Сепаратор і гріюча камера з'єднуються між собою циркуляційною трубою 9.

Гріюча камера встановлена на трьох вертикальних опорах типу «лапа». Сепаратор – на циліндричній опорі, з'єднаний з днищем, та трьох опорах типу «лапа», що запобігають усуненню горизонтальних зміщень апарату (це зв'язано з великими габаритними розмірами апарату). Усі опори до корпусу приварюються.

#### 4.2.2 Вибір матеріалів для виготовлення випарного апарату

Вибір матеріалів для виготовлення будь-якого апарату залежить від технологічного процесу, що в ньому відбувається. До основних чинників, що впливають на вибір матеріалу, відносяться середовище, що міститься в апараті, тиск і температура [11]. Конструктивний матеріал повинен бути стійким до дії агресивних середовищ та корозії різних видів, мати достатню механічну міцність та стійкість, легко зварюватися, та забезпечувати надійність зварних з'єднань [20], а також виключати його взаємодію з середовищем, що міститься в апараті.

Основним критерієм при виборі матеріалу для виготовлення випарного апарату є середовище в ньому. Обраний матеріал повинен бути хімічно стійким під час контакту з розчином лимонної кислоти. Найбільш відповідає даним вимогам аустенітна сталь марки 1X21H5T [8]. Швидкість її корозії складає не більше 0,1 мм/рік. Із цієї сталі виготовляють корпус апарату, гріючі труби, трубну решітку, фланці та штуцера апарату, а також усі інші деталі, що контактують з розчином лимонної кислоти. Кріпильні елементи (болти, гайки) виконуються із сталі марки Ст3 [9], опори – із сталі марки 45X [10], для виготовлення прокладок використовують пароніт [11].

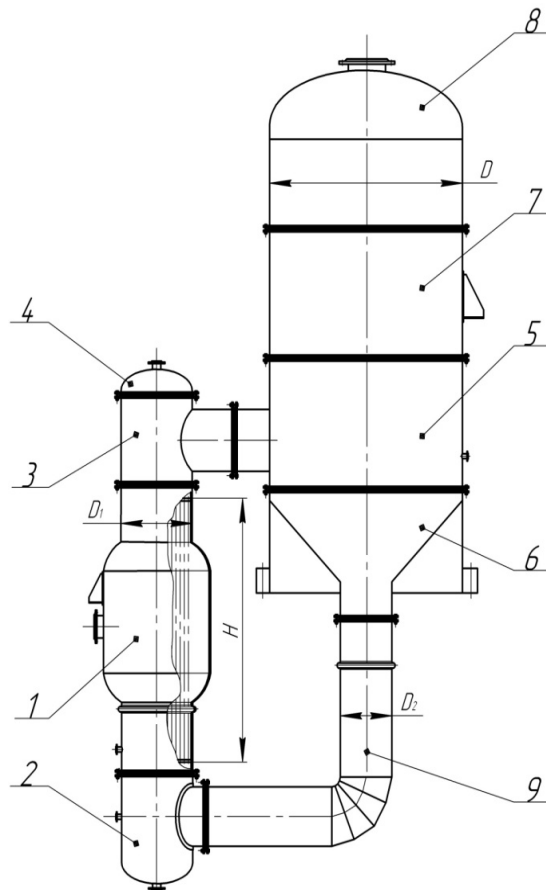


Рисунок 4.1 – Схема випарного апарату з виносною гріючою камерою:

- 1 – корпус гріючої камери; 2 – днище гріючої камери; 3 – царга гріючої камери;  
 4 – кришка гріючої камери; 5 – нижня царга сепаратора; 6 – днище сепаратора;  
 7 – верхня царга сепаратора; 8 – кришка сепаратора; 9 – циркуляційна труба

### 4.3 Технічна характеристика випарного апарату

1. Апарат, призначений для упарювання розчину лимонної кислоти.

2. Концентрація розчину, % (мас):

початкова	15
кінцева	65

3. Продуктивність, кг/с:

по вихідному продукту	2,89
по кінцевому продукту	0,667
по випареній волозі	2,223

4. Площа поверхні теплообміну, м<sup>2</sup>: 250

5. Середовище у апараті:

у сепараторі	розчин лимонної кислоти, водяна пара
у міжтрубному просторі	насичена водяна пара
у трубному просторі	розчин лимонної кислоти

6. Тиск, МПа:

у сепараторі	0,08
у міжтрубному просторі	0,4
у трубному просторі	0,1

7. Температура, С°:

у сепараторі	94
у міжтрубному просторі	144
у трубному просторі	102

8. Габаритні розміри, мм:

довжина	7490
ширина	3520
висота	13500

9. Маса, кг: 15000

#### 4.4 Розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність конструкції випарного апарату

##### 4.4.1 Технологічний розрахунок випарного апарату

Вихідні дані:

- початкова масова витрата розчину лимонної кислоти  $G_n = 2,89 \text{ кг/с}$ ;
- абсолютний тиск пари у сепараторі  $p_1 = 0,08 \text{ МПа}$ ;
- початкова концентрація розчину лимонної кислоти  $a_n = 15\%$ ;
- кінцева концентрація розчину лимонної кислоти  $a_k = 65\%$ ;
- початкова температура розчину лимонної кислоти  $t_n = 80^\circ\text{C}$ ;
- абсолютний тиск гріючої пари  $p_{gn} = 0,4 \text{ МПа}$ ;
- вологовміст гріючої пари  $\varphi = 3\%$ .

Співвідношення температур у апараті описується рівнянням [23]:

$$t_{gn} > t_{kin} > t_k > t_1 > t_0. \quad (52)$$

Температура вторинної пари у сепараторі випарного апарату  $t_1$  визначається як температура насичення при тиску  $p_1$  [23]. У відповідності до [24]  $t_1 = 93,52^\circ\text{C}$ . З іншого боку:

$$t_1 = t_0 + \Delta t_{zo}, \quad (53)$$

де  $t_0$  – температура вторинної пари в барометричному конденсаторі (визначається як температура насичення при тиску  $p_0$ );  $\Delta t_{zo}$  – гідравлічна депресія (зміна температури вторинної пари на ділянці сепаратору (барометричний конденсатор), викликана перепадом тиску пари, який виникає в результаті перепаду гідравлічного опору в паропроводі вторинної пари). Згідно з [23] приймаємо  $\Delta t_{zo} = 1,5^\circ\text{C}$ .



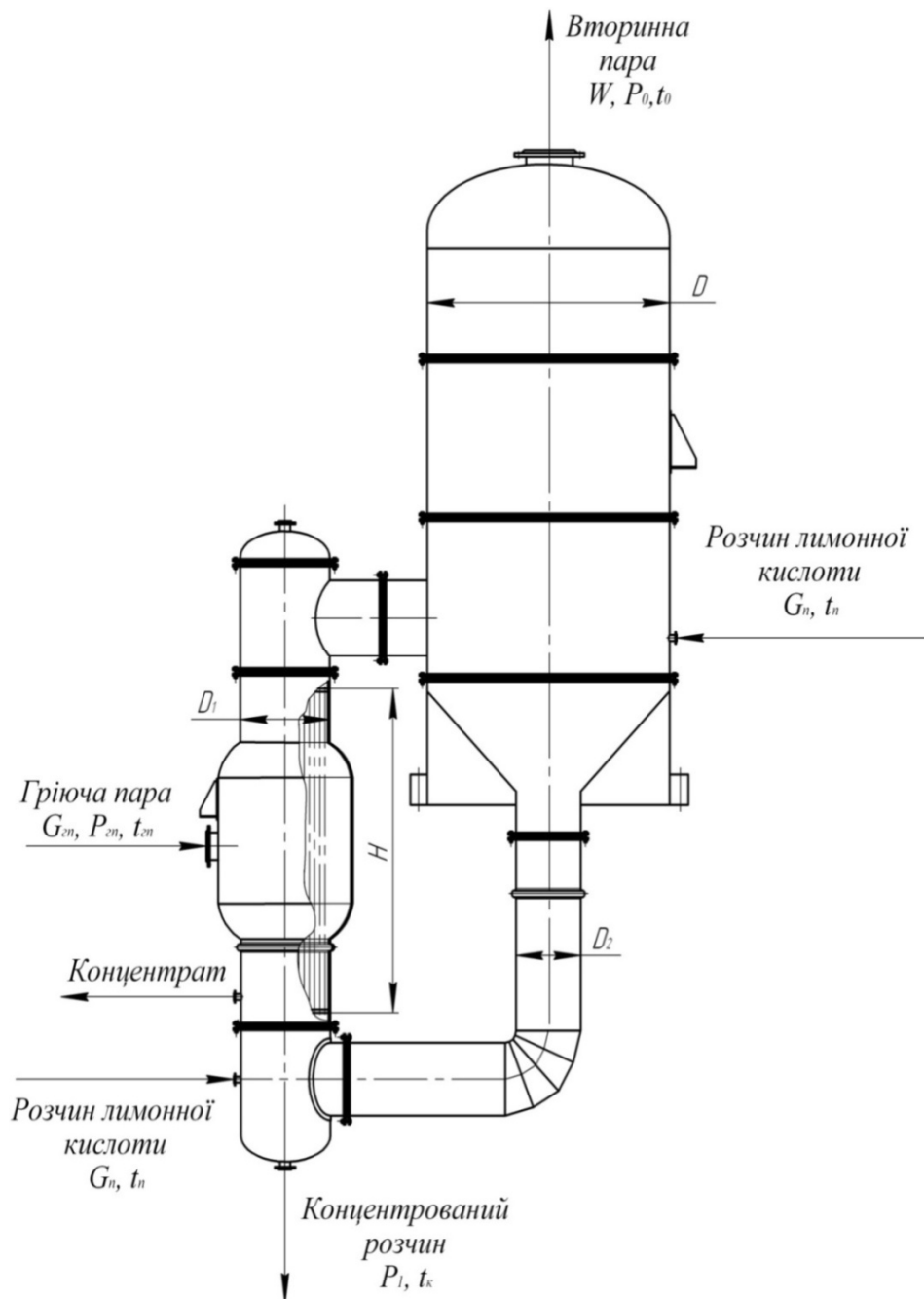


Рисунок 4.1 – Розрахункова схема вакуум-випарного апарату з природною циркуляцією

З рівняння (53) температура пари в барометричному конденсаторі:

$$t_0 = t_1 - \Delta t_{\text{до}} = 93,52 - 1,5 = 92,02^\circ\text{C}.$$

Температура кипіння розчину в сепараторі випарного апарату, при якій упарений розчин виводиться з апарату [23]:

$$t_k = t_1 + \Delta t_{\text{депр}}, \quad (54)$$

де  $\Delta t_{\text{депр}}$  – температурна депресія, що виражає підвищення температури розчину в порівнянні з температурою кипіння чистого розчинника (води) при тому ж тиску.

$$\Delta t_{\text{депр}} = 16,2 \cdot \frac{T_1^2}{r_1} \cdot \Delta^{атм}, \quad (55)$$

де  $T_1$ ,  $r_1$  – температура кипіння і теплота пароутворення для води при тиску  $p_1$ :  $T_1 = t_1 + 273 = 93,52 + 273 = 366,52^\circ\text{C}$ ,  $r_1 = 2273 \text{ кДж/кг}$  [24];  $\Delta^{атм}$  – температурна депресія при атмосферному тиску.

Температура кипіння розчину лимонної кислоти при концентрації  $a_k = 65\%$  становить:  $t_{\text{кип.л.к.}} = 102,46^\circ\text{C}$  [2]. Температура кипіння води при атмосферному тиску  $t_{\text{кип.води}} = 100^\circ\text{C}$ .

$$\Delta^{атм} = t_{\text{кип.л.к.}} - t_{\text{кип.води}} = 102,46 - 100 = 2,46^\circ\text{C}.$$

Підставимо отримане значення в (55) і отримаємо:

$$\Delta t_{\text{депр}} = 16,2 \cdot \frac{366,52^2}{2273 \cdot 10^3} \cdot 2,46 = 2,335^\circ\text{C};$$

тоді (54) набуде значення:

$$t_k = 93,52 + 2,335 = 95,875^\circ\text{C}.$$

Середня температура кипіння розчину в трубах [23]:

$$t_{\text{кин}} = t_k + \Delta t_{\text{зс}}, \quad (56)$$

де  $\Delta t_{\text{зс}}$  – гідростатична депресія (підвищення температури кипіння розчину внаслідок гідростатичного тиску, що виникає за рахунок тиску шару рідини в апараті) [23]:

$$\Delta t_{\text{зс}} = t_{\text{ср}} - t_1, \quad (57)$$

де  $t_{\text{ср}}$  – температура кипіння води при середньому тиску розчину в трубах випарного апарату  $p_{\text{ср}}$ :

$$p_{\text{ср}} = p_1 + 0,5 \cdot \rho_p \cdot g \cdot H_p, \quad (58)$$

де  $\rho_p$  – густина розчину при  $t'_{\text{кин}} \approx 107^\circ\text{C}$  [23] (одбирається довільно з урахуванням, що  $t_{\text{кин}} > t_k$ ):

$$\rho_p' = (1,01 + 0,47 \cdot a_{\kappa}) \cdot 10^3 - 0,51 \cdot t_{\text{кин}}' =$$

$$= (1,01 + 0,47 \cdot 0,65) \cdot 10^3 - 0,51 \cdot 107 = 1260,93 \text{ кг/м}^3.$$

де  $H_p$  – оптимальна висота рівня в гріючих трубах [23]:

$$H_p = [0,26 + 0,0014 \cdot (\rho_p' - \rho_{\text{в.кин}})] \cdot H_{\text{тр}}, \quad (59)$$

де  $H_{\text{тр}}$  – робоча висота труб:  $H_{\text{тр}} = 4000 \text{ мм}$  [8];  $\rho_{\text{в.кин}}$  – густина води при  $t_{\text{кин}}'$ :  $\rho_{\text{в.кин}} = 953,1 \text{ кг/м}^3$  [16]. Підставимо знайдені значення в (59) і отримаємо:

$$H_p = [0,26 + 0,0014 \cdot (1260,93 - 953,1)] \cdot 4 = 2,764 \text{ м.}$$

За (58) середній тиск рідини в трубах:

$$p_{cp} = 0,8 \cdot 10^5 + 0,5 \cdot 1260,93 \cdot 9,81 \cdot 2,764 = 0,971 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

У відповідності до [24]  $t_{cp} = 99,04 \text{ }^\circ\text{C}$ , тоді за (57) гідростатична депресія:

$$\Delta t_{\text{зд}} = 99,04 - 93,52 = 5,52 \text{ }^\circ\text{C},$$

підставивши її в (56) отримаємо:

$$t_{\text{кин}} = 95,875 + 5,52 = 101,395 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Різниця між температурою конденсації гріючої пари  $t_{\text{зн}}$  і температурою конденсації вторинної пари у барометричному конденсаторі  $t_0$  називається загальною різницею температур, яка визначається за формулою:

$$\Delta t_{\text{заг}} = t_{\text{зн}} - t_0. \quad (60)$$

де  $t_{\text{зн}}$  – температура гріючої пари при тиску  $p_{\text{зн}}$ . Відповідно до [24]  $t_{\text{зн}} = 143,62 \text{ }^\circ\text{C}$ , тоді формула (60) прийме значення:

$$\Delta t_{\text{заг}} = 143,62 - 92,02 = 51,6 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Різниця між температурою конденсації гріючої пари  $t_{\text{зн}}$  і температурою кипіння розчину  $t_{\text{кин}}$  називається корисною різницею температур і визначається за формулою [23]:

$$\Delta t_{\text{кор}} = t_{\text{зн}} - t_{\text{кин}} = \Delta t_{\text{заг}} - (\Delta t_{\text{зс}} + \Delta t_{\text{депр}} + \Delta t_{\text{зд}}) =$$

$$= 51,6 - (1,5 + 2,355 + 5,52) = 42,225 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Матеріальний баланс у випарному апараті:

$$G_n = G_k + W; \quad (61)$$

по абсолютно сухій речовині [25]:

$$G_n \cdot a_n = G_k \cdot a_k; \quad (62)$$

кінцева масова витрата розчину лимонної кислоти:

$$G_k = \frac{G_n \cdot a_n}{a_k} = \frac{2,89 \cdot 0,15}{0,65} = 0,667 \text{ кг/с.}$$

З (61) кількість випареної води:

$$W = G_n - G_k = 2,89 - 0,667 = 2,223 \text{ кг/с.}$$

Кількість теплоти, переданої від гріючої пари до киплячого розчину:

$$Q_{zn} = G_n \cdot c_{p,n} \cdot (t_k - t_n) + W \cdot (i_{en} - c_{p,v} \cdot t_k) + Q_{втр}, \quad (63)$$

де  $c_{p,n}$  – теплоємність розчину лимонної кислоти при початковій концентрації та температурі:

$$\begin{aligned} c_{p,n} &= (0,99 - 0,66 \cdot a_n + 0,001 \cdot t_n) \cdot 4,19 = \\ &= (0,99 - 0,66 \cdot 0,15 + 0,001 \cdot 80) \cdot 4,19 = 4,068 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}; \end{aligned}$$

де  $i_{en}$  – питома ентальпія водяної пари при  $t_1$ :  $i_{en} = 2663 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$  [24];  $c_{p,v}$  – теплоємність води при  $t_{кип}$ :  $c_{p,v} = 4,23 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$  [17];  $Q_{втр}$  – втрати теплоти в навколишнє середовище.

З урахуванням втрат рівняння (63) можна записати у вигляді [23]:

$$\begin{aligned} Q_{zn} &= 1,05 \cdot [G_n \cdot c_{p,n} \cdot (t_k - t_n) + W \cdot (i_{en} - c_{p,v} \cdot t_k)] = \\ &= 1,05 \cdot [2,89 \cdot 4,068 \cdot 10^3 (95,875 - 80) + \\ &+ 2,223 \cdot (2663 \cdot 10^3 - 4,23 \cdot 10^3 \cdot 95,875)] = 5,466 \cdot 10^6 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Витрата гріючої пари:

$$G_{zn} = \frac{Q_{zn}}{r_{zn} \cdot x}, \quad (64)$$

де  $r_{zn}$  – теплота пароутворення при  $p_{zn}$ :  $r_{zn} = 2133 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$ ;  $x$  – паровміст (ступінь сухості) гріючої пари:

$$x = 1 - \frac{\varphi}{100} = 1 - \frac{3}{100} = 0,97,$$

тоді з (64) масова витрата гріючої пари:

$$G_{zn} = \frac{5,466 \cdot 10^6}{2133 \cdot 10^3 \cdot 0,97} = 2,641 \text{ кг/с.}$$

Питома витрата гріючої пари:

$$d = \frac{G_{zn}}{W} = \frac{2,641}{2,223} = 1,188 \text{ кг/кг.}$$

У випадку конденсації водяної пари на стінках пучка  $n$ , вертикальних труб висотою  $H_{mp}$  середнє значення коефіцієнту тепловіддачі визначається за формулою [23]:

$$\alpha_1 = 1,21 \cdot \lambda_{\epsilon} \cdot \left( \frac{\rho_{\epsilon}^2 \cdot r_{zn} \cdot g}{\mu_{\epsilon} \cdot H_{mp}} \right)^{0,33} \cdot q^{-0,33} = A \cdot q^{-0,33}, \quad (65)$$

де усі константи визначаються при температурі конденсату  $t_{конд} = t_{zn} = 143,62^\circ\text{C}$ . Тоді, відповідно до [17]:  $\lambda_{\epsilon} = 68,464 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ,  $\rho_{\epsilon} = 922,742 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu_{\epsilon} = 0,192 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

Тоді, використовуючи (65), значення коефіцієнту  $A$ :

$$A = 1,21 \cdot \lambda_{\epsilon} \cdot \left( \frac{\rho_{\epsilon}^2 \cdot r_{zn} \cdot g}{\mu_{\epsilon} \cdot H_{mp}} \right)^{0,33} = 1,21 \cdot 68,464 \cdot 10^{-2} \times \\ \times \left( \frac{922,742^2 \cdot 2133 \cdot 10^3 \cdot 9,81}{0,192 \cdot 10^{-3} \cdot 5} \right)^{0,33} = 193583,741.$$

Коефіцієнт тепловіддачі для киплячого розчину знаходимо за формулою [23]:

$$\alpha_2 = b \cdot \left( \frac{\lambda_p^2 \cdot \rho_p}{\mu_p \cdot \sigma_p \cdot (t_{кин} + 273)} \right)^{0,33} \cdot q^{0,67} = B \cdot q^{0,67}, \quad (66)$$

де

$$b = 0,075 \cdot \left[ 1 + 10 \cdot \left( \frac{\rho_p}{\rho_{zn}} - 1 \right)^{-0,67} \right]. \quad (67)$$

Усі константи визначають при температурі кипіння розчину лимонної кислоти у трубах  $t_{кин} = 101,395^\circ\text{C}$ , за формулами:

$$\begin{aligned}\rho_p &= (1,01 + 0,47 \cdot a_\kappa) \cdot 10^3 + 0,51 \cdot t_{кин} = (1,01 + 0,47 \cdot 0,65) \cdot 10^3 + \\ &+ 0,51 \cdot 101,395 = 1261,824 \text{ кг/м}^3; \\ \mu_p &= \exp \cdot \left( 7,4 \cdot a_\kappa^{1,65} \cdot \frac{100}{100 + t_{кин}} \right) \cdot \mu'_\epsilon, \quad (68)\end{aligned}$$

де  $\mu'_\epsilon$  – коефіцієнт динамічної в'язкості води при температурі розчину. Згідно з [17]  $\mu'_\epsilon = 0,276 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ . Тоді (68) набуде значення:

$$\mu_p = \exp \cdot \left( 7,4 \cdot 0,65^{1,65} \cdot \frac{100}{100 + 101,395} \right) \cdot 0,268 \cdot 10^{-3} = 1,612 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

У відповідності з [2]:  $\lambda_p = 0,174 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ;  $\sigma_p = 584,42 \cdot 10^{-4} \text{ Н/м}$ . В (68)  $\rho_{zn}$  – густина гріючої пари при  $t_{zn}$ . Згідно з [17]  $\rho_{zn} = 2,459 \text{ кг/м}^3$ . Підставимо всі значення в (68) і отримаємо.

$$b = 0,075 \cdot \left[ 1 + 10 \cdot \left( \frac{1261,824}{2,459} - 1 \right)^{-0,67} \right] = 0,086.$$

Використовуючи (15), знайдемо значення коефіцієнта  $B$ :

$$\begin{aligned}B &= b \cdot \left( \frac{\lambda_p^2 \cdot \rho_p}{\mu_p \cdot \sigma_p \cdot (t_{кин} + 273)} \right)^{0,33} = \\ &= 0,086 \cdot \left( \frac{0,174^2 \cdot 1261,824}{1,612 \cdot 10^{-3} \cdot 584,42 \cdot 10^{-4} \cdot (101,395 + 273)} \right)^{0,33} = 0,86.\end{aligned}$$

Визначимо термічний опір стінки і забруднень на ній [14]:

$$\sum R_{cm} = \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + r_{забр1} + r_{забр2}, \quad (69)$$

де  $r_{забр1} = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ ,  $r_{забр2} = 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$  [16] – термічні опори стінки викликані забрудненнями зі сторони руху водяною парою та лимонної кислоти відповідно;  $\lambda_{cm} = 46,5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки;  $\delta_{cm} = 0,002 \text{ м}$  [13] – товщина стінки. Тоді (69) прийме значення:

$$\sum R_{cm} = \frac{0,002}{46,5} + 1,1 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 10^{-4} = 3,53 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}.$$

Коефіцієнт теплопередачі від гріючої пари до розчину лимонної кислоти визначається за формулою [23]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum R_{cm} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{A \cdot q^{0,33}} + \sum R_{cm} + \frac{1}{B \cdot q^{0,67}}}; \quad (70)$$

з іншого боку:

$$k = \frac{q}{\Delta t_{кор}}, \quad (71)$$

тоді:

$$y = \frac{q^{1,33}}{A} + q \sum R_{cm} + \frac{q^{0,33}}{B} - \Delta t_{кор} = 0. \quad (72)$$

Побудуємо графік залежності  $y = f(q)$ , попередньо задавши значеннями теплового потоку  $q_1 = 0 \text{ Вт/м}^2$  і  $q_2 = 50000 \text{ Вт/м}^2$ , тоді:

$$y_1 = \frac{0^{1,33}}{193583,741} + 0 \cdot 3,53 \cdot 10^{-4} + \frac{0^{0,33}}{0,86} - 42,225 = -42,225;$$

$$y_2 = \frac{50000^{1,33}}{193583,741} + 50000 \cdot 3,53 \cdot 10^{-4} + \frac{50000^{0,33}}{0,86} - 42,225 = 25,923.$$

За знайденими значеннями будуємо графік залежності  $y = f(q)$  зображений на рисунку 4.2.

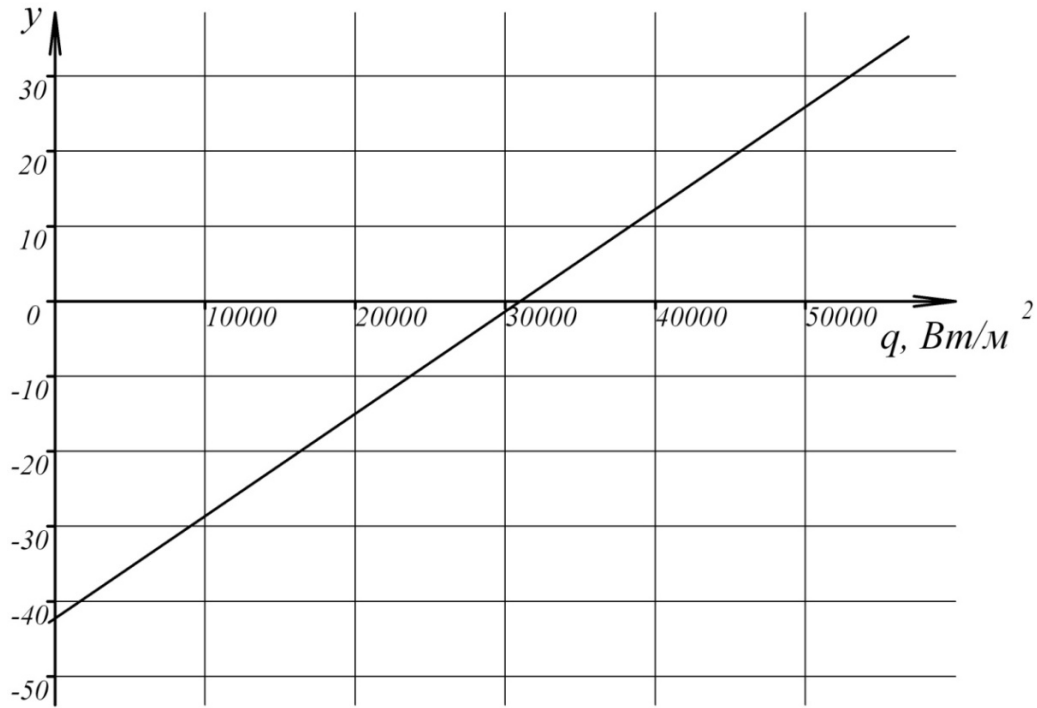


Рисунок 4.2 – Графік залежності  $y = f(q)$

З графіку знаходимо значення питомого теплового потоку при  $y=0$ :  
 $q = 30980 \text{ Вт/м}^2$ .

Коефіцієнти тепловіддачі визначаються за формулами (65) та (66) [23]:

$$\alpha_1 = A \cdot q^{-0,33} = 193583,741 \cdot 30980^{-0,33} = 6380 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К},$$

$$\alpha_2 = B \cdot q^{0,67} = 0,86 \cdot 30980^{0,67} = 878 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Коефіцієнт теплопередачі за формулою (70)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{6380} + 3,53 \cdot 10^{-4} + \frac{1}{878}} = 607 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Визначаємо необхідну площу поверхні теплообміну [23]:

$$F = \frac{Q_{\text{en}}}{k \cdot \Delta t_{\text{пол}}} = \frac{5,466 \cdot 10^6}{607 \cdot 42,225} = 213,261 \text{ м}^2.$$

За ГОСТ 11987- 81 приймаємо випарний апарат тип 1 виконання 2 з природною циркуляцією і виносною гріючою камерою з наступними параметрами (див. рисунок 13):

– площа поверхні теплообміну  $F = 250 \text{ м}^2$ ;



- висота гріючих труб  $H_{mp} = 4000$  мм ;
- внутрішній діаметр гріючої камери  $D = 1400$  мм;
- внутрішній діаметр сепаратора  $D_1 = 3200$  мм;
- внутрішній діаметр циркуляційної труби  $D_2 = 900$  мм;
- діаметр труб  $d = 38 \times 2$  мм.

#### 4.4.2 Гідравлічний розрахунок випарного апарату

Швидкість руху лимонної кислоти у випарному апараті [26]:

$$w = \frac{4 \cdot G_n}{\pi \cdot D^2 \cdot \rho_p} = \frac{4 \cdot 2,89}{3,14 \cdot 1,4^2 \cdot 1261,8} = 1,49 \cdot 10^{-3} \text{ м/с.}$$

Критерій Рейнольдса при даній швидкості:

$$Re = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{1,49 \cdot 10^{-3} \cdot 1,4 \cdot 1261,824}{1,612 \cdot 10^{-3}} = 1633,$$

тоді коефіцієнт опору рідини при русі її по трубах:

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64}{1633} = 0,039.$$

Коефіцієнти місцевих опорів [26]:

- вхід у апарат та вихід із нього:  $\xi_1 = 1,5$ ;
- вхід у труби та вихід із них:  $\xi_2 = 1,0$ ;
- поворот на  $90^\circ$ :  $\xi_3 = 1,0$ .

Сума коефіцієнтів місцевих опорів:

$$\sum \xi = 2 \cdot \xi_1 + 2 \cdot \xi_2 + 4 \cdot \xi_3 = 2 \cdot 1,5 + 2 \cdot 1 + 4 \cdot 1 = 9,0.$$

Перепад тиску в апараті [26]:

$$\begin{aligned} \Delta p &= \left( \lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum \xi \right) \cdot \frac{w^2 \cdot \rho_p}{2} = \\ &= \left( 0,039 \cdot \frac{5}{0,038} + 9,0 \right) \cdot \frac{1,49^2 \cdot 10^{-6} \cdot 1261,8}{2} = 0,02 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Оскільки перепад тиску дуже малий, то використовувати додатковий насос непотрібно.

#### 4.4.3 Розрахунок барометричного конденсатора

Масова витрата води, що витрачається на конденсацію вторинної пари [27]:

$$G_{\epsilon} = \frac{W \cdot (i_0 - c_{\epsilon 0} \cdot t_{0\kappa})}{c_{\epsilon 0} \cdot (t_{0\kappa} - t_{0n})}, \quad (73)$$

де  $t_{0\kappa}$  – кінцева температура суміші води та конденсату вторинної пари:

$$t_{0\kappa} = t_0 - 3,0 = 92,02 - 3,0 = 89,02^\circ\text{C};$$

$t_{0n}$  – початкова температура води, якою конденсують вторинну пару,  $t_{0n} = 20^\circ\text{C}$  [27];  $i_0$  – питома ентальпія вторинної пари в барометричному конденсаторі,  $i_0 = 2662,04 \cdot 10^3$  Дж/кг [24];  $c_{\epsilon 0}$  – теплоємність води при  $t_{0\kappa}$ ,  $c_{\epsilon 0} = 4,19 \cdot 10^3$  Дж/кг·К [17], тоді (73) прийме значення:

$$G_{\epsilon} = \frac{2,223 \cdot (2662,04 \cdot 10^3 - 4,19 \cdot 10^3 \cdot 89,02)}{4,19 \cdot 10^3 \cdot (89,02 - 20)} = 17,6 \text{ кг/с.}$$

Діаметр барометричного конденсатора [27]:

$$D_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot W}{\rho_{\epsilon n} \cdot \pi \cdot w_{\epsilon n}}}, \quad (74)$$

де  $\rho_{\epsilon n}$  – густина вторинної пари при  $t_0$ ,  $\rho_{\epsilon n} = 0,455$  кг/м<sup>3</sup> [17];  $w_{\epsilon n}$  – швидкість руху вторинної пари:

$$w_{\epsilon n} = \frac{4 \cdot W}{\pi \cdot d_K^2 \cdot \rho_{\epsilon n}}, \quad (75)$$

де  $d_K$  – діаметр умовного проходу штуцера виходу вторинної пари:  $d_K = 800$  мм, тоді, швидкість вторинної пари складатиме:

$$w_{\epsilon n} = \frac{4 \cdot 2,223}{3,14 \cdot 0,8^2 \cdot 0,455} = 9,725 \text{ м/с.}$$

Підставимо отримані значення в (74) і отримаємо:

$$D_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,223}{0,455 \cdot 3,14 \cdot 9,725}} = 0,8 \text{ м.}$$

Обираємо стандартний барометричний конденсатор [27] з наступними параметрами (див. рисунок 4.3):

- внутрішній діаметр барометричного конденсатору  $D_0 = 800$  мм;
- відстань від верхньої полиці до кришки апарату  $a = 1300$  мм;
- відстань від нижньої полиці до днища апарату  $r = 1200$  мм;
- ширина полиці  $b' = 500$  мм;
- відстань між осями конденсатору та пастки  $K'_1 = 950$  мм,  
 $K'_2 = 835$  мм;
- висота апарату  $H_0 = 5080$  мм;
- ширина апарату  $T_0 = 2350$  мм;
- діаметр пастки  $D_{n1} = 500$  мм,  $D_{n2} = 400$  мм;
- висота пастки  $h_{n1} = 1700$  мм,  $h_{n2} = 1350$  мм;
- відстань між полицями  $a_1 = 200$  мм,  $a_2 = 260$  мм,  $a_3 = 320$  мм,  
 $a_4 = 380$  мм,  $a_5 = 440$  мм;
- діаметри умовного проходу штуцерів:
  - А – для входу вторинної пари 350 мм;
  - Б – для входу води 200 мм;
  - В – для виходу парогазової суміші 125 мм;
  - Г – для барометричної труби 200 мм;
  - С – для з'єднання з атмосферою 25 мм;
  - И – для входу парогазової суміші 180 мм;
  - Ж – для виходу парогазової суміші 80 мм;
  - Е – для барометричної труби 70 мм.

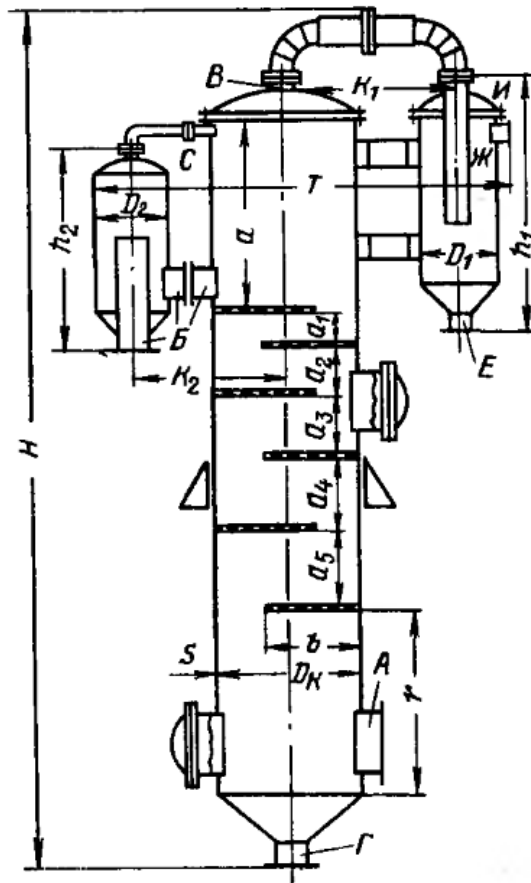


Рисунок 4.3 – Схема барометричного конденсатора з сегментними перегородками

Швидкість води в барометричній трубі:

$$w_{\text{в}} = \frac{4 \cdot (G_{\text{в}} + W)}{\rho_{\text{в}0} \cdot \pi \cdot d_{\text{бт}}^2}, \quad (76)$$

де  $\rho_{\text{в}0}$  – густина води при температурі  $t_0$ :  $\rho_{\text{в}0} = 963,6 \text{ кг/м}^3$  [14];  $d_{\text{бт}}$  – діаметр барометричних труб:  $d_{\text{бт}} = 200 \text{ мм}$  [26], підставивши в (76), отримаємо значення швидкості:

$$w_{\text{в}} = \frac{4 \cdot (17,6 + 2,223)}{963,6 \cdot 3,14 \cdot 0,2^2} = 0,655 \text{ м/с.}$$

Висота барометричних труб визначається зі співвідношення [27]:

$$H_{\text{бт}} = \frac{B'}{\rho_{\text{в}0} \cdot g} + \left( 1 + \sum \xi' + \lambda' \cdot \frac{H_{\text{бт}}}{d_{\text{бт}}} \right) \cdot \frac{w_{\text{в}}^2}{2 \cdot g} + 0,5, \quad (77)$$

де  $B'$  – залишковий тиск (вакуум) у барометричному конденсаторі:

$$B' = p_{атм} - p_0, \quad (78)$$

де  $p_{атм}$  – атмосферний тиск:  $p_{атм} = 0,1 \cdot 10^6$  Па [24];  $p_0$  – тиск у барометричному конденсаторі при  $t_0$ :  $p_0 = 0,076 \cdot 10^6$  Па [24], тоді:

$$B' = 0,1 \cdot 10^6 - 0,076 \cdot 10^6 = 0,024 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$\sum \xi'$  – сумарний коефіцієнт місцевого опору,  $\sum \xi' = 2$  [26];  $\lambda'$  – коефіцієнт тертя (визначається в залежності від режиму руху рідини в трубах).

Критерій Рейнольдса визначаємо за формулою:

$$Re' = \frac{w_e \cdot d_{ом} \cdot \rho_{e0}}{\mu_{e0}}, \quad (79)$$

де  $\mu_{e0}$  – коефіцієнт динамічної в'язкості води при температурі  $t_0$ :  $\mu_{e0} = 0,308 \cdot 10^{-3}$  Па·с [17], тоді:

$$Re' = \frac{0,655 \cdot 0,2 \cdot 963,6}{0,308 \cdot 10^{-3}} = 410.$$

При знайденому критерії Рейнольдса коефіцієнт тертя визначається за формулою [26]:

$$\lambda' = 0,11 \cdot \left( \frac{\Delta}{d_{ом}} + \frac{68}{Re'} \right)^{0,25}, \quad (80)$$

де  $\Delta$  – шорсткість труб:  $\Delta = 0,2$  мм [24], тоді:

$$\lambda' = 0,11 \cdot \left( \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{0,2} + \frac{68}{410} \right)^{0,25} = 0,07.$$

Підставимо отримані значення у (77) і перепишемо його наступним чином:

$$H_{ом} = \frac{0,024 \cdot 10^6}{963,6 \cdot 9,81} + \left( 1 + 2 + 0,07 \cdot \frac{H_{ом}}{0,2} \right) \cdot \frac{0,655^2}{2 \cdot 9,81} + 0,5,$$

зробивши необхідні перетворення, отримаємо:  $H_{ом} = 3,234$  м.

Продуктивність вакуум-насосу визначається за формулою [27]:

$$\begin{aligned} G_{нов} &= 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot (W + G_e) + 0,01 \cdot W = \\ &= 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot (2,223 + 17,6) + 0,01 \cdot 2,223 = 22,725 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}. \end{aligned}$$

Об'ємна продуктивність вакуум-насосу:

$$V_{нов} = R \cdot (273 + t_{нов}) \cdot \frac{G_{нов}}{M_{нов} \cdot p_{нов}}, \quad (81)$$

де  $R$  – універсальна газова стала:  $R = 8,31 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$  [24];  $M_{нов}$  – молярна маса повітря:  $M_{нов} = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$  [24];  $t_{нов}$  – температура повітря, яка визначається за формулою:

$$t_{нов} = t_{0н} + 4 + 0,1 \cdot (t_{0к} - t_{0н}) = 20 + 4 + 0,1 \cdot (89,02 - 20) = 30,9^\circ\text{C};$$

$p_{нов}$  – тиск повітря в апараті:

$$p_{нов} = p_0 - p_n, \quad (82)$$

$p_n$  – тиск насиченої водяної пари при  $t_{нов}$ :  $p_n = 0,45 \cdot 10^4 \text{ Па}$  [24], тоді:

$$p_{нов} = 0,76 \cdot 10^5 - 0,045 \cdot 10^5 = 0,715 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Підставивши необхідні значення в (30), отримаємо:

$$V_{нов} = 8,31 \cdot (273 + 30,9) \cdot \frac{22,725 \cdot 10^{-3}}{29 \cdot 10^{-3} \cdot 0,715 \cdot 10^5} = 0,028 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Зі стандартного ряду для нашого випарного апарату обираємо вакуум-насос ВВН-3 із такими параметрами [27]:

- продуктивність  $V_{нов} = 3 \text{ м}^3/\text{хв}$ ;
- потужність на валу  $N_{нов} = 6,5 \text{ кВт}$ .

#### 4.4.4 Розрахунок штуцерів випарного апарату

Вихідні дані:

- додаток до розрахункової товщини стінки  $c' = 1,5 \text{ мм}$ ;
- допустиме напруження матеріалу штуцера  $[\sigma] = 267 \text{ МПа}$ ;
- коефіцієнт міцності зварних швів  $\varphi = 0,95$ .

У таблиці 11 наведено перелік штуцерів, їх умовний діаметр, та основні параметри фланцевого з'єднання останніх з трубопроводами.

Таблиця 4.1 Характеристика штуцерів випарного апарату

№	Умовне позначення	$D_y$ , мм	$D_\phi$ , мм	$p$ , МПа	Болти	$z$ , шт	$h_\phi$ , мм
1	Е	400	535	0,4	М22	16	18
2	Ж	800	975	0,1	М30	24	21
3	К	65	160	0,1	М14	4	11
4	Л	50	140	0,1	М14	4	10
5	М	50	140	0,2	М14	4	10
6	Н	40	130	0,136	М14	4	10
7	П	50	140	0,136	М14	4	10
8	Р	50	140	0,1	М14	4	10
9	С	25	100	0,1	М11	4	10
10	Т	25	100	0,1	М11	4	10
11	Ш	40	130	0,1	М14	4	10

Схема штуцера до розрахунку наведена на рисунку 6. Товщини стінок патрубків розраховуємо за формулою (19).

Штуцер для вводу гріючої пари ( $D_y = 400$  мм):

$$S_1^R = \frac{0,4 \cdot 0,4}{2 \cdot 267 \cdot 0,95 - 0,4} = 0,32 \text{ мм},$$

з урахуванням додатку  $c'$ :

$$S_1' = S_1^R + c' = 0,32 + 1,5 = 1,82 \text{ мм}.$$

Штуцер для виходу вторинної пари ( $D_y = 800$  мм):

$$S_2^R = \frac{0,1 \cdot 0,8}{2 \cdot 267 \cdot 0,95 - 0,1} = 0,16 \text{ мм},$$

з урахуванням додатку  $c'$ :

$$S_2' = S_2^R + c' = 0,16 + 1,5 = 1,66 \text{ мм}.$$

Штуцер для вводу розчину ( $D_y = 65$  мм):

$$S_3^R = \frac{0,1 \cdot 0,065}{2 \cdot 267 \cdot 0,95 - 0,1} = 0,01 \text{ мм},$$

з урахуванням додатку  $c'$ :

$$S_3' = S_3^R + c' = 0,01 + 1,5 = 1,51 \text{ мм}.$$

Штуцер для виходу конденсату і для з'єднання з атмосферою ( $D_y = 50$  мм):

$$S_4^R = S_8^R = \frac{0,1 \cdot 0,05}{2 \cdot 267 \cdot 0,95 - 0,1} = 0,01 \text{ мм},$$

з урахуванням додатку  $c'$ :

$$S_4' = S_4^R + c' = 0,01 + 1,5 = 1,51 \text{ мм}.$$

Штуцер для миття апарату ( $D_y = 40$  мм):

$$S_5^R = \frac{0,2 \cdot 0,05}{2 \cdot 267 \cdot 0,95 - 0,2} = 0,02 \text{ мм},$$

з урахуванням додатку  $c'$ :

$$S_5' = S_5^R + c' = 0,02 + 1,5 = 1,52 \text{ мм}.$$

Штуцер для відбору проб ( $D_y = 40$  мм):

$$S_6^R = \frac{0,136 \cdot 0,04}{2 \cdot 267 \cdot 0,95 - 0,136} = 0,01 \text{ мм},$$

з урахуванням додатку  $c'$ :

$$S_6' = S_6^R + c' = 0,01 + 1,5 = 1,51 \text{ мм}.$$

Штуцер для зливання розчину з апарату ( $D_y = 50$  мм):

$$S_7^R = \frac{0,136 \cdot 0,05}{2 \cdot 267 \cdot 0,95 - 0,136} = 0,01 \text{ мм},$$

з урахуванням додатку  $c'$ :

$$S_7' = S_7^R + c' = 0,01 + 1,5 = 1,51 \text{ мм}.$$

Штуцер для гільзи термометра і манометра ( $D_y = 25$  мм):

$$S_9^R = S_{10}^R = \frac{0,1 \cdot 0,025}{2 \cdot 267 \cdot 0,95 - 0,1} = 0,005 \text{ мм},$$

з урахуванням додатку  $c'$ :

$$S_9' = S_9^R + c' = 0,005 + 1,5 = 1,505 \text{ мм}.$$

Штуцер для гільзи барометра ( $D_y = 40$  мм):



$$S_{11}^R = \frac{0,1 \cdot 0,04}{2 \cdot 267 \cdot 0,95 - 0,1} = 0,01 \text{ мм},$$

з урахуванням додатку  $c'$ :

$$S_{11}' = S_{11}^R + c' = 0,01 + 1,5 = 1,51 \text{ мм}.$$

Приймаємо товщину стінок всіх штуцерів рівною 2мм.

Довжину штуцерів визначаємо за формулою (20).

Штуцер для вводу гріючої пари ( $D_y = 400 \text{ мм}$ ):

$$l_1 = 1,25 \cdot \sqrt{0,4 \cdot (0,002 - 0,0015)} = 0,018 \text{ м}.$$

Штуцер для виводу вторинної пари ( $D_y = 800 \text{ мм}$ ):

$$l_2 = 1,25 \cdot \sqrt{0,8 \cdot (0,002 - 0,0015)} = 0,025 \text{ м}.$$

Штуцер для вводу розчину ( $D_y = 65 \text{ мм}$ ):

$$l_3 = 1,25 \cdot \sqrt{0,065 \cdot (0,002 - 0,0015)} = 0,007 \text{ м}.$$

Штуцер для відведення конденсату, промивання апарату, зливу розчину і з'єднання з атмосферою ( $D_y = 50 \text{ мм}$ ):

$$l_4 = l_5 = l_7 = l_8 = 1,25 \cdot \sqrt{0,05 \cdot (0,002 - 0,0015)} = 0,006 \text{ м}.$$

Штуцер для відбору проб та гільзи баромера ( $D_y = 40 \text{ мм}$ ):

$$l_6 = l_{11} = 1,25 \cdot \sqrt{0,04 \cdot (0,002 - 0,0015)} = 0,006 \text{ м}.$$

Штуцер для гільзи термометра та манометра ( $D_y = 25 \text{ мм}$ ):

$$l_9 = l_{10} = 1,25 \cdot \sqrt{0,025 \cdot (0,002 - 0,0015)} = 0,004 \text{ мм}.$$

Розрахунковий виліт штуцерів має досить мале значення, то (для зручності з'єднання з трубопроводами) приймаємо його рівними 120мм.

#### 4.4.5 Розрахунок товщини стінки деталей випарного апарату

Вихідні дані:

- абсолютний тиск гріючої пари  $p_{гн} = 0,4 \text{ МПа}$ ;
- абсолютний тиск навколишнього середовища  $p_{атм} = 0,1 \text{ МПа}$ ;

- абсолютний тиск пари в сепараторі  $p_1 = 0,08$  МПа;
- діаметр гріючої камери  $D = 1,4$  м;
- діаметр сепаратора  $D_1 = 3,2$  м;
- діаметр циркуляційної труби  $D_2 = 0,9$  м;
- висота гріючої камери  $H_{зк} = 7,29$  м;
- висота днища гріючої камери  $H_{дн.зк} = 2,39$  м;
- висота царги гріючої камери  $H_{ц.зк} = 1,68$  м;
- висота верхньої царги сепаратора  $H_{в.ц.с} = 1,86$  м;
- висота нижньої царги сепаратора  $H_{н.ц.с} = 1,89$  м;
- висота днища сепаратора  $H_{дн.с} = 1,49$  м;
- висота циркуляційної труби  $H_{ц.т} = 3,39$  м;
- половина кута конусності днища сепаратора  $\alpha = 45^\circ$ ;
- модуль пружності (Юнга) матеріалу стінки  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;
- коефіцієнт міцності зварних швів  $\varphi = 0,95$ ;
- коефіцієнт запасу стійкості  $n_y = 2,4$ ;
- густина розчину лимонної кислоти  $\rho_g = 1261,8$  кг/м<sup>3</sup>;
- прискорення вільного падіння  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

#### 4.4.5.1 Розрахунок товщини стінки деталей гріючої камери

##### 4.4.5.1.1 Розрахунок товщини стінки корпусу гріючої камери

Схема до розрахунку товщини, що знаходиться під внутрішнім тиском зображено на рисунку 7.

Розрахункову товщину стінки циліндричного корпусу гріючої камери розраховуємо за формулою:

$$S_{к.зк}^R = \frac{p_{зк} \cdot D}{2[\sigma] \cdot \varphi - p_{зк}} = \frac{0,4 \cdot 10^6 \cdot 1,4}{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot 0,95 - 0,4 \cdot 10^6} = 0,0011 \text{ м.}$$

тоді, за формулою (23) товщина стінки буде рівна:

$$S_{\kappa.зк} = 1,1 + 1,5 + 0 + 0 + 1,4 = 4 \text{ мм},$$

де  $c_4 = 1,4 \text{ мм}$ .

Допустимий тиск на стінку:

$$[p]_{\kappa.зк} = \frac{2[\sigma] \cdot \varphi \cdot (S_{зк} - c')}{D + S_{зк} - c'} = \frac{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot 0,95 \cdot (0,004 - 0,0015)}{1,4 + 0,004 - 0,0015} = 0,904 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Перевіримо виконання умови міцності (24):

$$0,904 \text{ МПа} > 0,4 \text{ МПа}.$$

Умова виконується, отже приймаємо товщину стінки гріючої камери рівною 4 мм.

#### 4.4.5.1.2 Розрахунок товщини стінки днища гріючої камери

Розрахункова схема еліптичного днища, що знаходиться під дією внутрішнього тиску зображена на рисунку 8.

Для знаходження товщини стінки днища гріючої камери визначимо гідравлічний тиск, що діє на нього:

$$p_{зк.з\partial} = \rho_p \cdot g \cdot H_{зк} = 1261,8 \cdot 9,81 \cdot 7,29 = 0,09 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

тоді розрахунковий тиск у апараті:

$$p_{зк} = p_1 + p_{з\partial} = 0,08 \cdot 10^6 + 0,09 \cdot 10^6 = 0,17 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

За отриманого тиску товщина стінки днища гріючої камери визначатиметься за формулою [11]:

$$\begin{aligned} S_{\partialн.зк}^R &= \frac{p_{зк} \cdot D}{2[\sigma] \cdot \varphi - p_{зк}} \cdot \frac{D}{2H_{\partialн.зк}} = \\ &= \frac{0,204 \cdot 10^6 \cdot 1,4}{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot 0,95 - 0,17 \cdot 10^6} \cdot \frac{1,7}{2 \cdot 2,39} = 0,00016 \text{ м}. \end{aligned}$$

За (23) товщина стінки днища гріючої камери дорівнює:

$$S_{\partialн.зк} = 0,16 + 1,5 + 0 + 0 + 0,34 = 2 \text{ мм},$$

де  $c_4 = 0,34 \text{ мм}$ .

Допустимий тиск на стінку [11]:

$$[p]_{\partial H, \partial K} = \frac{2[\sigma] \cdot \varphi \cdot (S_{\partial H, \partial K} - c')}{D + S_{\partial H, \partial K} - c'} =$$

$$= \frac{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot 0,95 \cdot (0,002 - 0,0015)}{1,4 + 0,002 - 0,0015} = 0,181 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

За формулою (24) перевіримо, чи виконується умова міцності:

$$0,181 \text{ МПа} > 0,17 \text{ МПа} - \text{умова виконується.}$$

#### 4.4.5.1.3 Розрахунок товщини стінки царги гріночної камери

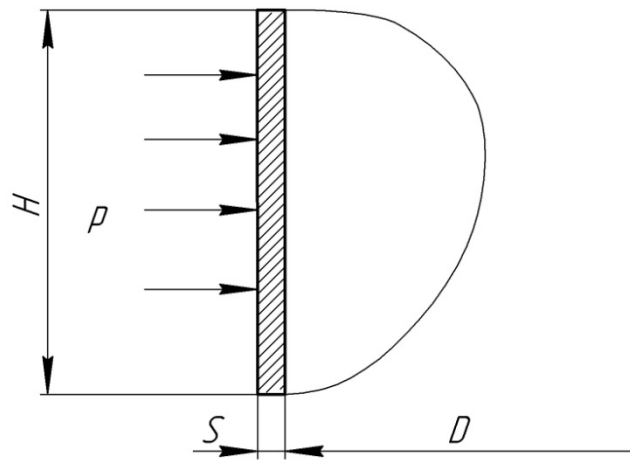


Рисунок 16 – Розрахункова схема для розрахунку товщини стінки циліндричної обичайки, що знаходиться під зовнішнім тиском

Розрахуємо товщину стінки царги гріночної камери за допомогою наступної формули [11]:

$$S_R = \max \left\{ \frac{K_2 \cdot D \cdot 10^{-2}}{1,1 \cdot p_{атм} \cdot \frac{D}{2[\sigma]}} \right\}, \quad (83)$$

де  $K_2$  – коефіцієнт, який визначається графічно за допомогою коефіцієнтів:

$$K_3^{ц.зк} = \frac{H_{ц.зк}}{D} = \frac{1,68}{1,4} = 1,2,$$

$$K_1^{ц.зк} = \frac{n_y \cdot p_{атм}}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot E} = \frac{2,4 \cdot 1,0 \cdot 10^5}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 0,5,$$

де  $E$  – модуль пружності (Юнга) матеріалу,

$$K_4^{y.zk} = \frac{10^3 \cdot [\sigma]}{E} = \frac{10^3 \cdot 267 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 1,335,$$

тоді  $K_2^{y.zk} = 0,35$ . Отже, розрахункове значення товщини стінки царги гріючої камери за (83):

$$S_{y.zk}^{R'} = K_2^{y.zk} \cdot D \cdot 10^{-2} = 0,35 \cdot 1,4 \cdot 10^{-2} = 0,0049 \text{ м};$$

$$S_{y.zk}^{R''} = 1,1 \cdot p_{atm} \cdot \frac{D}{2[\sigma]} = 1,1 \cdot 1,0 \cdot 10^5 \cdot \frac{1,4}{2 \cdot 267 \cdot 10^6} = 0,0003 \text{ м},$$

тоді:  $S_{y.zk}^R = S_{y.zk}^{R'} = 4,9 \text{ мм}$ .

Дійсна товщина стінки царги гріючої камери за (23):

$$S_{y.zk} = 4,9 + 1,5 + 0 + 0 + 1,6 = 8 \text{ мм},$$

де  $c_4 = 1,6 \text{ мм}$ .

Допустимий тиск на стінку:

$$[p] = \frac{[p]_M}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p]_M}{[p]_E} \right)^2}}, \quad (84)$$

де  $[p]_M$  – допустимий зовнішній тиск з умов міцності в умовах пружності:

$$[p]_{y.zk}^M = \frac{2[\sigma] \cdot (S_{y.zk} - c')}{D + S_{y.zk} - c'} = \frac{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot (0,008 - 0,0015)}{1,4 + 0,008 - 0,0015} = 2,468 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$[p]_E$  – допустимий зовнішній тиск з умов стійкості в умовах пружності:

$$[p]_{y.zk}^E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{H_{y.zk}} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (S_{y.zk} - c')}{D} \right]^{2,5}, \quad (85)$$

у якій:  $n_y$  – коефіцієнт запасу стійкості;  $B_1$  – коефіцієнт, який вибирається із співвідношення [11]:

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \cdot \frac{D}{H} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (S - c')}} \right\}, \quad (86)$$

$$B_1' = 1,0,$$

$$B_1'' = 9,45 \cdot \frac{D}{H_{ц.зк}} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (S_{ц.зк} - c')}} =$$

$$= 9,45 \cdot \frac{1,4}{1,68} \cdot \sqrt{\frac{1,4}{100 \cdot (0,008 - 0,0015)}} = 11,557.$$

Отже,  $B_1 = B_1' = 1,0$ .

Підставимо в (85) і отримаємо:

$$[p]_{ц.зк}^E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{2,4 \cdot 1,0} \cdot \frac{1,4}{1,67} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (0,008 - 0,0015)}{1,4} \right]^{2,5} = 0,212 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

Підставимо отримані значення допустимих тисків у (84), і перевіримо, чи виконується співвідношення (24):

$$[p]_{ц.зк} = \frac{2,468}{\sqrt{1 + \left( \frac{2,468}{0,212} \right)^2}} = 0,211 \text{ МПа};$$

$0,211 \text{ МПа} > 0,1 \text{ МПа}$  – умова міцності виконується.

#### 4.4.5.1.4 Розрахунок товщини стінки кришки гріючої камери

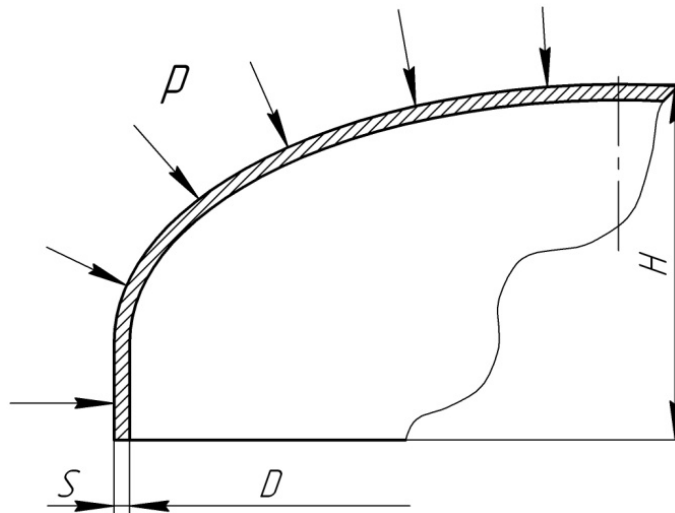


Рисунок 4.4 – Розрахункова схема для розрахунку товщини стінки

еліптичної кришки (днища), що знаходиться під зовнішнім тиском

Розрахунок товщини кришки гріючої камери проводимо у відповідності зі співвідношенням [11]:

$$S_{\kappa,2\kappa}^R = \max \left\{ \frac{0,9D}{510} \cdot \sqrt{\frac{n_y \cdot p_{атм}}{10^{-6} \cdot E}}, \frac{p_{атм} \cdot D}{2[\sigma]} \right\}, \quad (87)$$

$$S_{\kappa,2\kappa}^{R'} = \frac{0,9D}{510} \cdot \sqrt{\frac{n_y \cdot p_{атм}}{10^{-6} \cdot E}} = \frac{0,9 \cdot 1,4}{510} \cdot \sqrt{\frac{2,4 \cdot 1,0 \cdot 10^5}{10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}} = 0,0027 \text{ м};$$

$$S_{\kappa,2\kappa}^{R''} = \frac{p_{атм} \cdot D}{2[\sigma]} = \frac{1,0 \cdot 10^5 \cdot 1,4}{2 \cdot 267 \cdot 10^6} = 0,0003 \text{ м},$$

тоді,  $S_{\kappa,2\kappa}^R = S_{\kappa,2\kappa}^{R'} = 2,7 \text{ мм}$ .

Виконавча товщина стінки кришки гріючої камери за (24):

$$S_{\kappa,2\kappa} = 2,7 + 1,5 + 0 + 0 + 1,8 = 6 \text{ мм},$$

де  $c_4 = 1,8 \text{ мм}$ .

Допустимий тиск визначається за формулою (84), у якій [11]:

$$[p]_{\kappa,2\kappa}^M = \frac{2[\sigma] \cdot (S_{\kappa,2\kappa} - c')}{D + 0,5(S_{\kappa,2\kappa} - c')} = \frac{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot (0,006 - 0,0015)}{1,4 + 0,5 \cdot (0,006 - 0,0015)} = 1,714 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

$$[p]_{\kappa}^E = \frac{26 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (S_{\kappa} - c')}{K_e \cdot D} \right]^2, \quad (88)$$

де:

$$K_e^{\kappa,2\kappa} = \frac{1 + (2,4 + 8 \cdot x') \cdot x'}{1 + (3 + 10 \cdot x') \cdot x'}, \quad (89)$$

у якій:

$$x'_{\kappa,2\kappa} = \frac{15 \cdot (S_{\kappa,2\kappa} - c')}{D} = \frac{15 \cdot (0,006 - 0,0015)}{1,4} = 0,048.$$

Підставимо значення  $x'$  в (89), а потім отримане значення в (88) і отримаємо:

$$K_e = \frac{1 + (2,4 + 8 \cdot 0,048) \cdot 0,048}{1 + (3 + 10 \cdot 0,048) \cdot 0,048} = 0,971,$$

$$[p]_{\kappa, \kappa}^E = \frac{26 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{2,4} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (0,006 - 0,0015)}{0,971 \cdot 1,4} \right]^2 = 0,237 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Підставимо отримані значення допустимих тисків у (84), і перевіримо, чи виконується співвідношення (24):

$$[p]_{\kappa, \kappa} = \frac{1,714}{\sqrt{1 + \left( \frac{1,714}{0,237} \right)^2}} = 0,235 \text{ МПа;}$$

$0,235 \text{ МПа} > 0,1 \text{ МПа}$  – умова міцності виконується.

#### 4.4.5.2 Розрахунок товщини стінки деталей сепаратора

##### 4.4.5.2.1 Розрахунок товщини стінки верхньої царги сепаратора

Розрахункову товщину стінки верхньої царги сепаратора (див. рисунок 16) знаходимо за формулою (83) у якій [11]:

$$K_3^{\kappa, \kappa, c} = \frac{H_{\kappa, \kappa, c}}{D_1} = \frac{1,86}{3,2} = 0,581,$$

$$K_1^{\kappa, \kappa, c} = \frac{n_y \cdot p_{атм}}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot E} = \frac{2,4 \cdot 1,0 \cdot 10^5}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 0,5,$$

$$K_4^{\kappa, \kappa, c} = \frac{10^3 \cdot [\sigma]}{E} = \frac{10^3 \cdot 267 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 1,335,$$

тоді:  $K_2^{\kappa, \kappa, c} = 0,28$ ;

$$S_{\kappa, \kappa, c}^{R'} = K_2 \cdot D_1 \cdot 10^{-2} = 0,28 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2} = 0,009 \text{ м,}$$

$$S_{\kappa, \kappa, c}^{R''} = 1,1 \cdot p_{атм} \cdot \frac{D_1}{2[\sigma]} = 1,1 \cdot 1,0 \cdot 10^5 \cdot \frac{3,2}{2 \cdot 267 \cdot 10^6} = 0,0007 \text{ м.}$$

Приймаємо  $S_{\kappa, \kappa, c}^R = S_{\kappa, \kappa, c}^{R'} = 9 \text{ мм.}$

Виконавча товщина стінки за формулою (23):

$$S_{\kappa, \kappa, c} = 9 + 1,5 + 0 + 0 + 1,5 = 12 \text{ мм,}$$

де  $c_4 = 1,5 \text{ мм.}$

Допустимий тиск визначається за формулою (84), у якій:



$$[p]_{\text{в.ц.с}}^M = \frac{2[\sigma] \cdot (S_{\text{в.ц.с}} - c')}{D_1 + S_{\text{в.ц.с}} - c'} = \frac{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot (0,012 - 0,0015)}{3,2 + 0,012 - 0,0015} = 1,746 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

$$[p]_{\text{в.ц.с}}^E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D_1}{H_{\text{в.ц.с}}} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (S_{\text{в.ц.с}} - c')}{D_1} \right]^{2,5}, \quad (90)$$

де коефіцієнт  $B_1$  визначається за формулою (86) у якій:

$$B_1' = 1,0,$$

$$B_1'' = 9,45 \cdot \frac{D_1}{H_{\text{в.ц.с}}} \cdot \sqrt{\frac{D_1}{100 \cdot (S_{\text{в.ц.с}} - c')}} =$$

$$= 9,45 \cdot \frac{3,2}{1,86} \cdot \sqrt{\frac{3,2}{100 \cdot (0,012 - 0,0015)}} = 28,382.$$

Приймаємо  $B_1 = B_1' = 1,0$ , тоді:

$$[p]_{\text{ц.с}}^E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{2,4 \cdot 1,0} \cdot \frac{3,2}{1,86} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (0,012 - 0,0015)}{3,2} \right]^{2,5} = 0,184 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Підставимо отримані значення допустимих тисків у (84), і перевіримо, чи виконується співвідношення (24):

$$[p]_{\text{ц.с}} = \frac{1,746}{\sqrt{1 + \left( \frac{1,746}{0,184} \right)^2}} = 0,183 \text{ МПа};$$

$0,183 \text{ МПа} > 0,1 \text{ МПа}$  – умова міцності виконується.

#### 4.4.5.2.2 Розрахунок товщини стінки нижньої царги сепаратора

Розрахункову товщину стінки нижньої царги сепаратора (див. рисунок 16) знаходимо за формулою (83) у якій:

$$K_3^{\text{н.ц.с}} = \frac{H_{\text{н.ц.с}}}{D_1} = \frac{1,89}{3,2} = 0,591,$$

$$K_1^{\text{н.ц.с}} = \frac{n_y \cdot P_{\text{атм}}}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot E} = \frac{2,4 \cdot 1,0 \cdot 10^5}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 0,5,$$

$$K_4^{н.ц.с} = \frac{10^3 \cdot [\sigma]}{E} = \frac{10^3 \cdot 267 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 1,335,$$

тоді:  $K_2^{н.ц.с} = 0,28$ ;

$$S_{н.ц.с}^{R'} = K_2^{н.ц.с} \cdot D_1 \cdot 10^{-2} = 0,28 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2} = 0,009 \text{ м},$$

$$S_{н.ц.с}^{R''} = 1,1 \cdot p_{атм} \cdot \frac{D_1}{2[\sigma]} = 1,1 \cdot 1,0 \cdot 10^5 \cdot \frac{3,2}{2 \cdot 267 \cdot 10^6} = 0,0007 \text{ м}.$$

Приймаємо  $S_{н.ц.с}^R = S_{н.ц.с}^{R'} = 9 \text{ мм}.$

Виконавча товщина стінки за (23):

$$S_{н.ц.с} = 9 + 1,5 + 0 + 0 + 1,5 = 12 \text{ мм},$$

де  $c_4 = 1,5 \text{ мм}.$

Допустимий тиск визначається за формулою (84), у якій:

$$[p]_{н.ц.с}^M = \frac{2[\sigma] \cdot (S_{н.ц.с} - c')}{D_1 + S_{н.ц.с} - c'} = \frac{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot (0,012 - 0,0015)}{3,2 + 0,012 - 0,0015} = 1,746 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

$$[p]_{н.ц.с}^E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D_1}{H_{н.ц.с}} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (S_{н.ц.с} - c')}{D_1} \right]^{2,5}, \quad (91)$$

де коефіцієнт  $B_1$  визначається за формулою (89) у якій:

$$B_1' = 1,0,$$

$$B_1'' = 9,45 \cdot \frac{D_1}{H_{н.ц.с}} \cdot \sqrt{\frac{D_1}{100 \cdot (S_{н.ц.с} - c')}} =$$

$$= 9,45 \cdot \frac{3,2}{1,89} \cdot \sqrt{\frac{3,2}{100 \cdot (0,012 - 0,0015)}} = 27,932.$$

Приймаємо  $B_1 = B_1' = 1,0$ , тоді:

$$[p]_{н.ц.с}^E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{2,4 \cdot 1,0} \cdot \frac{3,2}{1,89} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (0,012 - 0,0015)}{3,2} \right]^{2,5} = 0,181 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Підставимо отримані значення допустимих тисків у (84) і перевіримо, чи виконується співвідношення (24):

$$[p]_{н.ц.с} = \frac{1,746}{\sqrt{1 + \left(\frac{1,746}{0,181}\right)^2}} = 0,18 \text{ МПа};$$

$0,18 \text{ МПа} > 0,1 \text{ МПа}$  – умова міцності виконується.

#### 4.4.5.2.3 Розрахунок товщини стінки днища сепаратора

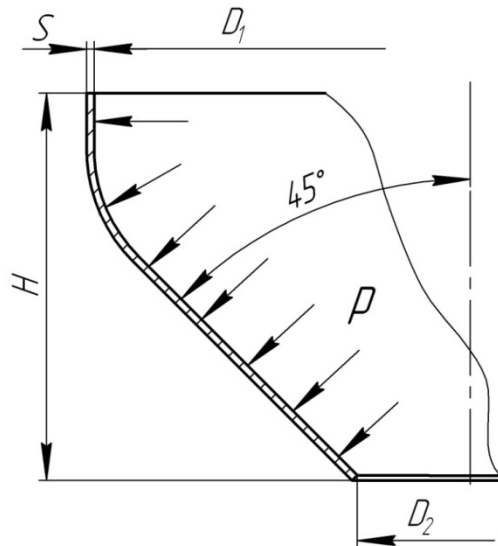


Рисунок 4.5 – Розрахункова схема для розрахунку товщини стінки  
конічного днища, що знаходиться під внутрішнім тиском

Для знаходження товщини стінки днища сепаратора необхідно визначити гідравлічний тиск, що діє на нього [11]:

$$p_{гд} = \rho_p \cdot g \cdot H_{дн} = 1261,8 \cdot 9,81 \cdot 1,49 = 0,018 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

тоді тиск у апараті складатиме:

$$p_{дн.с} = p_1 + p_{гд} = 0,8 \cdot 10^5 + 0,018 \cdot 10^6 = 0,098 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Оскільки внутрішній тиск на днище менший за атмосферний розрахункову товщину стінки днища сепаратора знаходимо за формулою (83) якщо:

$$H_z = \frac{D_1 - D_2}{2 \cdot \sin \alpha} = \frac{3,2 - 0,9}{2 \cdot \sin 45} = 1,627$$

$$D_E = \frac{D_1 - D_2}{2 \cdot \cos \alpha} = \frac{3,2 - 0,9}{2 \cdot \cos 45} = 1,627$$

тоді:

$$K_3^{\partial.c} = \frac{H_E}{D_E} = \frac{1,627}{1,627} = 1$$

$$K_1^{\partial.c} = \frac{n_y \cdot p_{амм}}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot E} = \frac{2,4 \cdot 1,0 \cdot 10^5}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 0,5$$

$$K_4^{\partial.c} = \frac{10^3 \cdot [\sigma]}{E} = \frac{10^3 \cdot 267 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 1,335$$

тоді:  $K_2^{\partial.c} = 0,5$ ;

$$S_{\partial.c}^{R'} = K_2^{\partial.c} \cdot D_E \cdot 10^{-2} = 0,5 \cdot 1,627 \cdot 10^{-2} = 0,0081 \text{ м},$$

$$S_{\partial.c}^{R''} = 1,1 \cdot p_{амм} \cdot \frac{D_E}{2[\sigma]} = 1,1 \cdot 1,0 \cdot 10^5 \cdot \frac{1,627}{2 \cdot 267 \cdot 10^6} = 0,0003 \text{ м}.$$

Приймаємо  $S_{\partial.c}^R = S_{\partial.c}^{R'} = 8,1 \text{ мм}.$

Виконавча товщина стінки за (23):

$$S_{\partial.c} = 8,1 + 1,5 + 0 + 0 + 0,4 = 10 \text{ мм},$$

де  $c_4 = 0,4 \text{ мм}.$

Допустимий тиск визначається за формулою (84), у якій:

$$[p]_{\partial.c}^M = \frac{2[\sigma] \cdot (S_{\partial.c} - c')}{\frac{D_E}{\cos \alpha} + S_{\partial.c} - c'} = \frac{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot (0,01 - 0,0015)}{\frac{1,627}{\cos 45} + 0,01 - 0,0015} = 1,965 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

$$[p]_{\partial.c}^E = \frac{2,21 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (S_{\partial.c} - c')}{D_E} \right]^3 =$$

$$= \frac{2,21 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{2,4} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (0,01 - 0,0015)}{1,627} \right]^3 = 0,263 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Підставимо отримані значення допустимих тисків у (84), і перевіримо, чи виконується співвідношення (24):

$$[p]_{\partial.c} = \frac{1,965}{\sqrt{1 + \left(\frac{1,965}{0,263}\right)^2}} = 0,261 \text{ МПа};$$

$0,261 \text{ МПа} > 0,1 \text{ МПа}$  – умова міцності виконується.

#### 4.4.5.2.4 Розрахунок товщини стінки кришки сепаратора

Розрахункову товщину стінки кришки сепаратора (див. рисунок 17) знаходимо за формулою (87) у якій:

$$S_{\kappa.c}^{R'} = \frac{0,9 \cdot D_1}{510} \cdot \sqrt{\frac{n_y \cdot p}{10^{-6} \cdot E}} = \frac{0,9 \cdot 3,2}{510} \cdot \sqrt{\frac{2,4 \cdot 1,0 \cdot 10^5}{10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}} = 0,0062 \text{ м},$$

$$S_{\kappa.c}^{R''} = \frac{p \cdot D_1}{2[\sigma]} = \frac{1,0 \cdot 10^5 \cdot 3,2}{2 \cdot 267 \cdot 10^6} = 0,0006 \text{ м}.$$

Приймаємо  $S_{\kappa.c}^R = S_{\kappa.c}^{R''} = 6,2 \text{ мм}$ .

Виконавча товщина стінки кришки сепаратора за (23):

$$S_{\kappa.c} = 6,2 + 1,5 + 0 + 0 + 0,3 = 8 \text{ мм},$$

де  $c_4 = 0,3 \text{ мм}$ .

Допустимий тиск визначається за формулою (84), у якій:

$$[p]_{\kappa.c}^M = \frac{2[\sigma] \cdot (S_{\kappa.c} - c')}{D_1 + 0,5(S_{\kappa.c} - c')} = \frac{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot (0,008 - 0,0015)}{3,2 + 0,5 \cdot (0,008 - 0,0015)} = 1,084 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

а допустимий тиск в умовах стійкості з умов пружності визначається за формулою (88) з урахуванням формули (89), у якій:

$$x'_{\kappa.c} = \frac{15 \cdot (S_{\kappa.c} - c')}{D_1} = \frac{15 \cdot (0,008 - 0,0015)}{3,2} = 0,03$$

тоді:

$$K_e^{\kappa.c} = \frac{1 + (2,4 + 8 \cdot 0,03) \cdot 0,03}{1 + (3 + 10 \cdot 0,03) \cdot 0,03} = 0,982;$$

$$[p]_{\kappa.c}^E = \frac{26 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{2,4} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (0,008 - 0,0015)}{0,982 \cdot 3,2} \right]^2 = 0,093 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Підставимо отримані значення допустимих тисків у (84), і перевіримо чи виконується співвідношення (24):

$$[p]_{\kappa.c} = \frac{1,084}{\sqrt{1 + \left(\frac{1,084}{0,093}\right)^2}} = 0,093 \text{ МПа};$$

$0,093 \text{ МПа} < 0,1 \text{ МПа}$  – умова міцності не виконується.

Збільшимо товщину стінки до 10мм, тоді допустимий тиск визначається за формулою (84), у якій:

$$[p]_{\kappa.c}^M = \frac{2[\sigma] \cdot (S_{\kappa.c} - c')}{D_1 + 0,5(S_{\kappa.c} - c')} = \frac{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot (0,01 - 0,0015)}{3,2 + 0,5 \cdot (0,01 - 0,0015)} = 1,417 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

а допустимий тиск в умовах стійкості з умов пружності визначається за формулою (88) з урахуванням формули (89), у якій:

$$x'_{\kappa.c} = \frac{15 \cdot (S_{\kappa.c} - c')}{D_1} = \frac{15 \cdot (0,01 - 0,0015)}{3,2} = 0,04$$

тоді:

$$K_e^{\kappa.c} = \frac{1 + (2,4 + 8 \cdot 0,04) \cdot 0,04}{1 + (3 + 10 \cdot 0,04) \cdot 0,04} = 0,976;$$

$$[p]_{\kappa.c}^E = \frac{26 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{2,4} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (0,01 - 0,0015)}{0,976 \cdot 3,2} \right]^2 = 0,161 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Підставимо отримані значення допустимих тисків у (84), і перевіримо чи виконується співвідношення (24):

$$[p]_{\kappa.c} = \frac{1,417}{\sqrt{1 + \left(\frac{1,417}{0,161}\right)^2}} = 0,16 \text{ МПа};$$

$0,16 \text{ МПа} > 0,1 \text{ МПа}$  – умова міцності виконується.

#### 4.4.5.3 Розрахунок товщини стінки циркуляційної труби

Для знаходження товщини стінки циркуляційної труби (див. рисунок 7) необхідно визначити гідравлічний тиск в ній:

$$p_{у.м.з\partial} = \rho_p \cdot g \cdot H_{у.м} = 1261,8 \cdot 9,81 \cdot 3,39 = 0,042 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

тоді тиск у апараті складатиме:

$$p_{у.м} = p_1 + p_{у.м.з\partial} = 0,8 \cdot 10^5 + 0,042 \cdot 10^6 = 0,122 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Розрахункова товщина стінки циркуляційної труби:

$$S_{у.м}^R = \frac{p_{у.м} \cdot D_2}{2[\sigma] \cdot \phi - p_{у.м}} = \frac{0,122 \cdot 10^6 \cdot 0,9}{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot 0,95 - 0,122 \cdot 10^6} = 0,0002 \text{ м}.$$

Виконавча товщина стінки за (23):

$$S_{у.м} = 0,2 + 1,5 + 0 + 0 + 0,3 = 2 \text{ мм},$$

де  $c_4 = 0,3 \text{ мм}$ .

Допустимий тиск [11]:

$$[p]_{у.м} = \frac{2[\sigma] \cdot \phi \cdot (S_{у.м} - c')}{D_2 + S_{у.м} - c'} =$$

$$= \frac{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot 0,95 \cdot (0,002 - 0,0015)}{0,9 + 0,002 - 0,0015} = 0,282 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

За формулою (27) перевіримо, чи виконується умова міцності:

$$0,282 \text{ МПа} > 0,122 \text{ МПа} - \text{так, виконується.}$$

#### 4.4.6 Розрахунок трубної решітки

Вихідні дані:

- діаметр гріючих труб  $d = 38 \times 2 \text{ мм}$ ;
- крок розміщення труб  $t = 48 \text{ мм}$ ;
- висота гріючих труб  $H_{тр} = 4000 \text{ мм}$ ;
- площа поверхні теплообміну  $F = 250 \text{ м}^2$ ;
- тиск у кожусі гріючої камери  $p_k = p_{en} = 0,4 \text{ МПа}$ ;
- тиск у гріючих трубах  $p_m = p_{cp} = 0,097 \text{ МПа}$ ;
- температура у кожусі гріючої камери  $t_k = t_{en} = 143,62^\circ\text{C}$ ;
- температура у гріючих трубах  $t_m = t_{kun} = 101,395^\circ\text{C}$ ;

- модуль пружності (Юнга) матеріалу стінки  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;
- температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу стінки  $\alpha' = 15,7 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ .

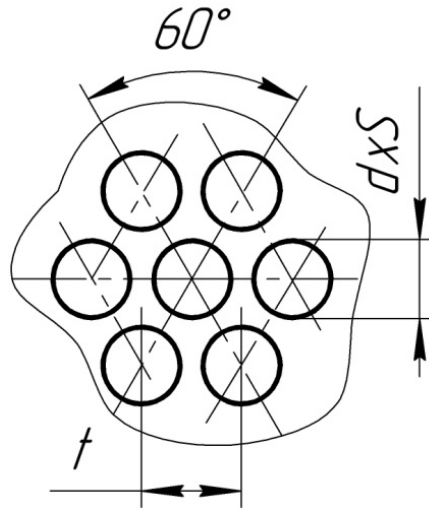


Рисунок 4.6 – Схема розміщення труб у трубній решітці гріючої камери

Зазор між трубами визначаємо із співвідношення [20]:

$$\delta = 0,866 \cdot t - d = 0,866 \cdot 48 - 38 = 3,568 \text{ мм.}$$

Кількість труб у трубній решітці:

$$n = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot H_{mp}} = \frac{250}{3,14 \cdot 0,038 \cdot 4} = 524.$$

Кількість труб на стороні шестикутника:

$$a'' = \frac{3 + \sqrt{12 \cdot n - 3}}{6} = \frac{3 + \sqrt{12 \cdot 524 - 3}}{6} = 14.$$

Кількість труб на діагоналі шестикутника:

$$b'' = 2 \cdot a'' - 1 = 2 \cdot 14 - 1 = 27.$$

Розрахунковий діаметр кожуха [21]:

$$D' = (b'' - 1) \cdot t + d + 2 \cdot (t - d) =$$

$$= (27 - 1) \cdot 0,048 + 0,038 + 2(0,048 - 0,038) = 1,296 \text{ м, — що відповідає}$$

прийнятому раніше.

Осьове зусилля в апараті, що виникає під дією тиску:



$$\begin{aligned}
Q' &= 0,785(D^2 - n \cdot d_3^2) \cdot p_\kappa + 0,785 \cdot n \cdot d_6^2 \cdot p_m = \\
&= 0,785(1,4^2 - 524 \cdot 0,038^2) \cdot 0,4 \cdot 10^6 + \\
&+ 0,785 \cdot 524 \cdot 0,034^2 \cdot 0,097 \cdot 10^5 = 0,424 \cdot 10^6 \text{ Н.}
\end{aligned}$$

Площа поперечного перерізу стінок труб:

$$F_m = 0,785 \cdot n \cdot (d_3^2 - d_6^2) = 0,785 \cdot 524 \cdot (0,038^2 - 0,034^2) = 0,118 \text{ м}^2.$$

Площа поперечного перерізу кожуху:

$$F_\kappa = 0,785 \cdot (D_3^2 - D_6^2) = 0,785 \cdot (1,408^2 - 1,4^2) = 0,018 \text{ м}^2.$$

Осьове зусилля, що виникає під дією тиску в трубах [20]:

$$Q'_m = \frac{Q' \cdot F_m \cdot E_m}{F_\kappa \cdot E_\kappa + F_m \cdot E_m} = \frac{0,424 \cdot 10^6 \cdot 0,118 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{0,018 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6 + 0,118 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 0,368 \cdot 10^6 \text{ Н,}$$

та в кожусі:

$$Q'_\kappa = \frac{Q' \cdot F_\kappa \cdot E_m}{F_\kappa \cdot E_\kappa + F_m \cdot E_m} = \frac{0,424 \cdot 10^6 \cdot 0,018 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{0,018 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6 + 0,118 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 0,056 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Напруження, що виникає під дією тиску в трубах:

$$\sigma'_m = \frac{Q'_m}{F_m} = \frac{0,368 \cdot 10^6}{0,118} = 3,119 \cdot 10^6 \text{ Па,}$$

і в кожусі:

$$\sigma'_\kappa = \frac{Q'_\kappa}{F_\kappa} = \frac{0,056 \cdot 10^6}{0,018} = 3,111 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Осьове зусилля, що виникає в наслідок різниці температур в трубах [21]:

$$\begin{aligned}
Q''_m &= -\frac{(t_m - t_\kappa) \cdot \alpha' \cdot F_m \cdot F_\kappa \cdot E}{F_\kappa + F_m} = \\
&= -\frac{(101,395 - 143,62) \cdot 15,7 \cdot 10^{-6} \cdot 0,018 \cdot 0,118 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{0,018 + 0,118} = 2,071 \cdot 10^6 \text{ Н,}
\end{aligned}$$

в кожусі:

$$Q''_\kappa = -Q''_m = -2,071 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Напруження, що виникає внаслідок різниці температур в трубах:

$$\sigma_m'' = \frac{Q_m''}{F_m} = \frac{2,071 \cdot 10^6}{0,118} = 17,551 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

в кожусі:

$$\sigma_\kappa'' = \frac{Q_\kappa''}{F_\kappa} = \frac{-2,071 \cdot 10^6}{0,018} = -115,056 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Осьове зусилля, що виникає в трубах:

$$Q_m = Q_m' + Q_m'' = (0,368 + 2,071) \cdot 10^6 = 2,439 \cdot 10^6 \text{ Н},$$

в кожусі:

$$Q_\kappa = Q_\kappa' + Q_\kappa'' = (0,056 - 2,071) \cdot 10^6 = -2,015 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

Навантаження, що виникає в трубах [20]:

$$\sigma_m = \sigma_m' + \sigma_m'' = (3,119 + 17,551) \cdot 10^6 = 20,67 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

в кожусі:

$$\sigma_\kappa = \sigma_\kappa' + \sigma_\kappa'' = (3,111 - 115,056) \cdot 10^6 = -111,945 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Товщина трубної решітки:

$$S_{mp} = \frac{d_H}{8} + 0,005 = \frac{0,038}{8} + 0,005 = 0,01 \text{ м}.$$

Перевіримо товщину трубної решітки на згин ромбічної ділянки:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{p_\kappa}{3,6 \left[ 1 - 0,7 \cdot \left( \frac{d_H}{t} \right) \right] \cdot \left( \frac{S_{mp}}{t} \right)^2} = \\ &= \frac{0,4 \cdot 10^6}{3,6 \cdot \left( 1 - 0,7 \cdot \frac{0,038}{0,048} \right) \cdot \left( \frac{0,01}{0,048} \right)^2} = 5,742 \cdot 10^6 \text{ Па}, \text{ — тиск на} \end{aligned}$$

трубну решітку менший за допустимий.

#### 4.4.7 Розрахунок фланцевих з'єднань випарного апарату

Вихідні дані:

- абсолютний тиск гріючої пари  $p_{zn} = 0,4 \text{ МПа}$ ;
- абсолютний тиск навколишнього середовища  $p_{атм} = 0,1 \text{ МПа}$ ;

- абсолютний тиск у циркуляційній трубі  $p_{um} = 0,122$  МПа;
- мінімальний тиск на прокладку  $p_{np} = 35$  МПа;
- температура середовища в гріючій камері  $t_{ек} = 143,62$  °С;
- температура середовища у сепараторі  $t_1 = 93,52$  °С;
- температура середовища у циркуляційній трубі  $t_k = 95,875$  °С;
- діаметр гріючої камери  $D = 1,4$  м;
- діаметр сепаратора  $D_1 = 3,2$  м;
- діаметр циркуляційної труби  $D_2 = 0,9$  м;
- товщина стінки гріючої камери  $S_{ек} = 4$  мм;
- товщина стінки сепаратора  $S_c = 12$  мм;
- товщина стінки циркуляційної труби  $S_{um} = 2$  мм;
- діаметр болта для фланцевого з'єднання гріючої камери  $d_{\sigma}^{ек} = 20$  мм;
- діаметр болта для фланцевого з'єднання сепаратора  $d_{\sigma}^c = 30$  мм;
- діаметр болта для фланцевого з'єднання циркуляційної труби  $d_{\sigma}^{um} = 20$  мм;
- площа поперечного перерізу болта для фланцевого з'єднання гріючої камери  $f_{\sigma}^{ек} = 2,35 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>;
- площа поперечного перерізу болта для фланцевого з'єднання сепаратора  $f_{\sigma}^c = 5,4 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>;
- площа поперечного перерізу болта для фланцевого з'єднання циркуляційної труби  $f_{\sigma}^{um} = 2,35 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>;
- ширина прокладки для фланцевого з'єднання гріючої камери  $b_{ек} = 20$  мм;
- ширина прокладки для фланцевого з'єднання сепаратора  $b_c = 25$  мм;

- ширина прокладки для фланцевого з'єднання циркуляційної труби  $b_{um} = 20$  мм;
- нормальний зазор між гайкою і втулкою  $u = 6$  мм;
- додаток до розрахункової товщини стінки  $c' = 1,5$  мм;
- допустиме напруження матеріалу фланця  $[\sigma] = 267$  МПа;
- допустиме напруження матеріалу болта при  $20^\circ\text{C}$   $[\sigma]_{\sigma}^{20} = 140$  МПа;
- допустиме напруження матеріалу болта при температурі гріючої камери  $[\sigma]_{\sigma}^{2K} = 132$  МПа;
- допустиме напруження матеріалу болта при температурі сепаратора  $[\sigma]_{\sigma}^c = 135$  МПа;
- допустиме напруження матеріалу болта при температурі циркуляційної труби  $[\sigma]_{\sigma}^{um} = 135$  МПа;
- допустимий тиск на прокладку  $[p]_{np} = 130$  МПа;
- допустимий кут повороту фланцю  $[\theta] = 0,026$  рад;
- модуль пружності (Юнга) матеріалу фланця  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;
- модуль пружності матеріалу болта  $E_{\sigma} = 1,99 \cdot 10^5$  МПа;
- модуль пружності матеріалу прокладки  $E_n = 2000$  МПа;
- коефіцієнт жорсткості прокладки  $k_{np} = 2,5$ ;
- коефіцієнт стискання прокладки  $k_n = 1$ ;
- температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу фланця  $\alpha' = 15,7 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ;
- температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу болта  $\alpha'' = 12,2 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ .

У випарному апараті використовуються плоскі приверні фланці типу «шип-паз» з прокладкою прямокутного перерізу. Схема фланцевого з'єднання та

навантаження, що діють на фланець в період роботи зображені на рисунках 9 та 10 відповідно.

#### 4.4.7.1 Розрахунок фланцевого з'єднання гріючої камери

Товщину стінки втулки фланця приймаємо, виходячи зі співвідношення (25):  $S_0^{2K} = 14$  мм.

Товщина втулки біля основи фланця визначається за формулою (26), якщо:  $\beta_1^{2K} = 1$  [12], тоді:

$$S_1^{2K} = 1 \cdot 14 = 14 \text{ мм.}$$

Висоту втулки визначимо за формулою [12]:

$$h_{\theta}^{2K} = 0,5 \cdot \sqrt{D \cdot (S_0^{2K} - c')} = 0,5 \cdot \sqrt{1400 \cdot (14 - 1,5)} = 66 \text{ мм.}$$

Еквівалентна товщина стінки втулки:  $S_{\text{екв}}^{2K} = S_0^{2K} = 14$  мм.

Діаметр болтової окружності визначається за формулою (27):

$$D_{\theta}^{2K} = 1400 + 2 \cdot (2 \cdot 14 + 20 + 6) = 1508 \text{ мм.}$$

Зовнішній діаметр фланця знаходимо за формулою (28), якщо  $a_{2K} = 40$  мм, тоді:

$$D_n^{2K} = 1508 + 40 = 1548 \text{ мм.}$$

Зовнішній діаметр прокладки за (29), якщо  $e_{2K} = 30$  мм:

$$D_{nn}^{2K} = 1708 - 30 = 1478 \text{ мм.}$$

Середній діаметр прокладки за (30):

$$D_{cn}^{2K} = 1478 - 20 = 1458 \text{ мм.}$$

Кількість болтів, необхідна для забезпечення герметичності за (31), якщо:

$$t_{ui}^{2K} = 5 \cdot d_{\theta}^{2K} = 5 \cdot 20 = 100 \text{ мм,}$$

тоді кількість болтів буде рівна:

$$n_{\theta}^{2K} = \frac{3,14 \cdot 1508}{100} = 48.$$

Товщину фланця визначимо за формулою (32), якщо  $\lambda_{\phi}^{2K} = 0,38$ :

$$h_{\phi}^{2K} = 0,38 \cdot \sqrt{1400 \cdot 14} = 54 \text{ мм.}$$

Розрахункова довжина болта визначається за формулою (33). Для фланців типу “шип-паз”, при товщині прокладки  $h_n^{2K} = 2$  мм, відстань між опірною поверхнею головки болта та гайки визначають за формулою (34):

$$l_{об}^{2K} \approx 2 \cdot (54 + 2) = 112 \text{ мм,}$$

а діаметр отвору під болт становить  $d'_{2K} = 23$  мм, тоді розрахункова довжина болта:

$$l_{\phi}^{2K} = 115 + 0,28 \cdot 23 = 119 \text{ мм.}$$

Приймаємо  $l_{\phi}^{2K} = 120$  мм.

Навантаження на фланець, яке виникає внаслідок дії тиску:

$$F_D^{2K} = \frac{p_{сн} \cdot \pi \cdot (D_{сн}^{2K})^2}{4} = \frac{0,4 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 1,458^2}{4} = 0,667 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Реакція прокладки викликана тиском за формулою (35), якщо ефективна ширина прокладки:

$$b_0^{2K} = 0,12 \cdot \sqrt{b_{2K}} = 0,12 \cdot \sqrt{0,02} = 0,017 \text{ м,}$$

тоді реакція прокладки буде рівна:

$$R_n^{2K} = 3,14 \cdot 1,458 \cdot 0,017 \cdot 2,5 \cdot 0,4 \cdot 10^6 = 0,078 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Податливість прокладки визначається за формулою (36):

$$y_n^{2K} = \frac{1 \cdot 0,002}{2000 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 1,458 \cdot 0,02} = 1,092 \cdot 10^{-11} \text{ м/Н.}$$

Кутова податливість фланця за (37). Попередньо визначемо:

$$\psi_1^{2K} = 1,28 \cdot \lg \frac{D_H^{2K}}{D} = 1,28 \cdot \lg \frac{1,548}{1,4} = 0,056,$$

$$\lambda_{\phi}^{2K'} = \frac{h_{\phi}^{2K}}{\sqrt{D \cdot S_{екв}^{2K}}} = \frac{0,054}{\sqrt{1,4 \cdot 0,014}} = 0,38,$$

$$\psi_2^{2K} = \frac{D_H^{2K} + D}{D_H^{2K} - D} = \frac{1,548 + 1,4}{1,548 - 1,4} = 19,919.$$

тоді, за (38):

$$v_{\varepsilon\kappa} = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot 0,38 \cdot \left(1 + \frac{0,056 \cdot 0,054^2}{0,014^2}\right)} = 0,615.$$

З урахуванням коефіцієнтів, визначених вище, кутова податливість фланця становитиме:

$$y_{\phi}^{\varepsilon\kappa} = [1 - 0,615 \cdot (1 + 0,9 \cdot 0,38)] \cdot \frac{19,919}{0,054^3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 0,116 \cdot 10^{-6} \text{ 1/Н м.}$$

Лінійна податливість болтів за (39):

$$y_{\bar{o}}^{\varepsilon\kappa} = \frac{0,12}{1,99 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4} \cdot 48} = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ м/Н.}$$

Коефіцієнт жорсткості фланцевого з'єднання:

$$k_{\text{жс}}^{\varepsilon\kappa} = \frac{y_{\bar{o}}^{\varepsilon\kappa} + 0,5 \cdot y_{\phi}^{\varepsilon\kappa} \cdot (D_{\bar{o}}^{\varepsilon\kappa} - D - S_{\text{екв}}^{\varepsilon\kappa}) \cdot (D_{\bar{o}}^{\varepsilon\kappa} - D_{\text{сн}}^{\varepsilon\kappa})}{y_n^{\varepsilon\kappa} + y_{\bar{o}}^{\varepsilon\kappa} + 0,5 \cdot y_{\phi}^{\varepsilon\kappa} \cdot (D_{\bar{o}}^{\varepsilon\kappa} - D_{\text{сн}}^{\varepsilon\kappa})^2} =$$

$$= \frac{5,3 \cdot 10^{-11} + 0,5 \cdot 0,116 \cdot 10^{-6} \cdot (1,508 - 1,4 - 0,014) \cdot (1,508 - 1,458)}{1,092 \cdot 10^{-11} + 5,3 \cdot 10^{-11} + 0,5 \cdot 0,116 \cdot 10^{-6} \cdot (1,508 - 1,458)^2} = 1,558$$

Зусилля, що виникає у фланці внаслідок температурних деформацій за (40, якщо):

$$t_{\phi}^{\varepsilon\kappa} = 0,96 \cdot t_{\text{сн}} = 0,96 \cdot 143,62 = 137,88^{\circ}\text{C},$$

$$t_{\bar{o}}^{\varepsilon\kappa} = 0,95 \cdot t_{\text{сн}} = 0,95 \cdot 143,62 = 136,44^{\circ}\text{C},$$

тоді:

$$F_t^{\varepsilon\kappa} = \frac{5,3 \cdot 10^{-11} \cdot 48 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4} \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{1,092 \cdot 10^{-11} + 5,3 \cdot 10^{-11} + 0,5 \cdot 0,126 \cdot 10^{-6} \cdot (1,508 - 1,458)^2} \times$$

$$\times (15,7 \cdot 10^{-6} \cdot 137,88 - 12,2 \cdot 10^{-6} \cdot 136,44) = 0,285 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Зусилля, що виникає у болтах в умовах монтажу знаходимо відповідно до співвідношення (41):

$$F_{\bar{o}1}^{\varepsilon\kappa'} = k_{\text{жс}}^{\varepsilon\kappa} \cdot F_D^{\varepsilon\kappa} + R_n^{\varepsilon\kappa} = 1,558 \cdot 0,667 \cdot 10^6 + 0,078 \cdot 10^6 = 1,117 \cdot 10^6 \text{ Н;}$$

$$F_{\bar{o}1}^{\varepsilon\kappa''} = 0,5 \cdot 3,14 \cdot 1,458 \cdot 0,017 \cdot 35 \cdot 10^6 = 1,362 \cdot 10^6 \text{ Н;}$$

$$F_{\bar{o}1}^{\varepsilon\kappa'''} = 0,4 \cdot [\sigma]_{\bar{o}}^{20} \cdot n_{\bar{o}}^{\varepsilon\kappa} \cdot f_{\bar{o}}^{\varepsilon\kappa} = 0,4 \cdot 140 \cdot 10^6 \cdot 48 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4} = 0,632 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Приймаємо:

$$F_{\bar{o}1}^{2K} = F_{\bar{o}1}^{2K''} = 1,362 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Зусилля на болти під час роботи апарату [12]:

$$\begin{aligned} F_{\bar{o}2}^{2K} &= F_{\bar{o}1}^{2K} + (1 - k_{\text{жс}}^{2K}) \cdot F_D^{2K} + F_t^{2K} = \\ &= 1,362 \cdot 10^6 + (1 - 1,558) \cdot 0,667 \cdot 10^6 + 0,285 \cdot 10^6 = 1,275 \cdot 10^6 \text{ Н.} \end{aligned}$$

Умова міцності болтів у період монтажу за співвідношенням (43)

$$\frac{F_{\bar{o}1}^{2K}}{n_{\bar{o}}^{2K} \cdot f_{\bar{o}}^{2K}} = \frac{1,362 \cdot 10^6}{48 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4}} = 120,745 \cdot 10^6 \text{ Па} < 140 \text{ МПа} - \text{ умова}$$

виконується.

Умова міцності болтів під час роботи за (44):

$$\frac{F_{\bar{o}2}^{2K}}{n_{\bar{o}}^{2K} \cdot f_{\bar{o}}^{2K}} = \frac{1,275 \cdot 10^6}{48 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4}} = 113,032 \cdot 10^6 \text{ Па} < 132 \text{ МПа} -$$

умова міцності виконується.

Умова міцності прокладки відповідно до співвідношення (45), у якому:

$$F_{\bar{o} \max}^{2K} = \max \left\{ \begin{matrix} F_{\bar{o}1}^{2K} \\ F_{\bar{o}2}^{2K} \end{matrix} \right\} = F_{\bar{o}1}^{2K} = 1,362 \cdot 10^6 \text{ Н,}$$

тоді:

$$\frac{F_{\bar{o} \max}^{2K}}{\pi \cdot D_{\text{сн}}^{2K} \cdot b_{2K}} = \frac{1,362 \cdot 10^6}{3,14 \cdot 1,458 \cdot 0,02} = 14,875 \cdot 10^6 \text{ Па} < 130 \text{ МПа} - \text{ умова}$$

міцності виконується.

Умова міцності втулки фланця, обмеженої розміром  $S_0$ , визначається за формулою (46), з урахуванням, що  $f_{\phi}^{2K} = 1$ , при

$$x_{2K} = \frac{h_{\bar{o}}^{2K}}{\sqrt{D \cdot S_0^{2K}}} = \frac{0,066}{\sqrt{1,4 \cdot 0,014}} = 0,471, \text{ тоді:}$$

$$T_H^{2K} = \frac{(D_H^{2K})^2 \cdot \left( 1 + 8,55 \cdot \lg \frac{D_H^{2K}}{D} \right) - D^2}{\left( 1,05 \cdot D^2 + 1,945 \cdot (D_H^{2K})^2 \right) \cdot \left( \frac{D_H^{2K}}{D} - 1 \right)} =$$



$$= \frac{1,548^2 \cdot \left(1 + 8,55 \cdot \lg \frac{1,548}{1,4}\right) - 1,4^2}{(1,05 \cdot 1,4^2 + 1,945 \cdot 1,548^2) \cdot \left(\frac{1,548}{1,4} - 1\right)} = 1,874,$$

Значення кутового моменту знаходимо зі співвідношення (49), у якому:

$$M_0^{\varepsilon K'} = 0,5 \cdot (D_{\delta}^{\varepsilon K} - D_{cn}^{\varepsilon K}) \cdot F_{\delta 1}^{\varepsilon K} = 0,5 \cdot (1,508 - 1,458) \cdot 1,362 \cdot 10^6 = 0,034 \cdot 10^6 \text{ Н м},$$

$$\begin{aligned} M_0^{\varepsilon K''} &= 0,5 \cdot \left[ (D_{\delta}^{\varepsilon K} - D_{cn}^{\varepsilon K}) \cdot F_{\delta 2}^{\varepsilon K} + (D_{cn}^{\varepsilon K} - D - S_{екв}^{\varepsilon K}) \cdot F_{Д}^{\varepsilon K} \right] \cdot \frac{[\sigma]_{\delta}^{20}}{[\sigma]_{\delta}^{\varepsilon K}} = \\ &= 0,5 \cdot \left[ (1,508 - 1,458) \cdot 1,275 \cdot 10^6 + (1,458 - 1,4 - 0,014) \cdot 0,667 \cdot 10^6 \right] \times \\ &\quad \times \frac{140 \cdot 10^6}{132 \cdot 10^6} = 0,049 \cdot 10^6 \text{ Н м}. \end{aligned}$$

Приймаємо:  $M_0^{\varepsilon K} = M_0^{\varepsilon K''} = 0,049 \cdot 10^6 \text{ Н м}$ ,  $D^* = D = 1,4 \text{ м}$ , тому що:

$$20 \cdot S_1^{\varepsilon K} = 20 \cdot 0,014 = 0,28 \text{ м} < 1,4 \text{ м}.$$

З урахуванням параметрів, визначених вище, за (48) знайдемо:

$$\sigma_1^{\varepsilon K} = \frac{1,874 \cdot 0,049 \cdot 10^6 \cdot 0,615}{1,4 \cdot (0,014 - 0,0015)^2} = 258,162 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Підставимо дане значення в (47) і отримаємо:

$$\sigma_0^{\varepsilon K} = 1 \cdot 258,162 = 258,162 \text{ МПа}.$$

$$\sigma_t^{\varepsilon K} = \frac{p_{zn} \cdot D}{2 \cdot (S_0^{\varepsilon K} - c')} = \frac{0,4 \cdot 10^6 \cdot 1,4}{2 \cdot (0,014 - 0,0015)} = 22,4 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

$$\sigma_m^{\varepsilon K} = \frac{p_{zn} \cdot D}{4 \cdot (S_0^{\varepsilon K} - c')} = \frac{0,4 \cdot 10^6 \cdot 1,4}{4 \cdot (0,014 - 0,0015)} = 11,2 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

$$[\sigma]_0 = 0,003 \cdot E = 0,003 \cdot 2 \cdot 10^5 = 600 \text{ МПа}.$$

$$[\sigma]_0 \cdot \varphi = 600 \cdot 0,95 = 570 \text{ МПа}.$$

Розрахуємо напруження у втулці та перевіримо виконання умови міцності [11]:

$$\sqrt{(\sigma_0^{\varepsilon K} + \sigma_m^{\varepsilon K})^2 + (\sigma_t^{\varepsilon K})^2 - (\sigma_0^{\varepsilon K} + \sigma_m^{\varepsilon K}) \cdot \sigma_t^{\varepsilon K}} =$$

$$= \sqrt{(258,162 + 11,2)^2 + 22,4^2} - (258,162 + 11,2) \cdot 22,4 = 258,89 \text{ МПа} < 570 \text{ МПа} - \text{умова міцності виконується.}$$

Умову герметичності фланцевого з'єднання розрахуємо за формулою (50), у якій:

$$\sigma_{\kappa}^{2\kappa} = M_0^{2\kappa} \cdot \left[ 1 - \nu_{2\kappa} \cdot (1 + 0,9 \cdot \lambda_{\phi}^{2\kappa}) \right] \cdot \frac{\psi_2^{2\kappa}}{D \cdot (h_{\phi}^{2\kappa})^2} =$$

$$= 0,049 \cdot 10^6 \cdot [1 - 0,615 \cdot (1 + 0,9 \cdot 0,38)] \cdot \frac{19,919}{1,4 \cdot 0,054^2} = 41,761 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

тоді умова герметичності матиме вигляд:

$$\theta_{2\kappa} = \frac{41,761 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} \cdot \frac{1,4}{0,054} = 0,0054 \text{ рад} < 0,026 \text{ рад} - \text{умова}$$

виконується.

#### 4.4.7.2 Розрахунок фланцевого з'єднання сепаратора

Розрахункова схема фланцевого з'єднання зображена на рисунку 9 та 10.

Товщину стінки втулки фланця, приймаємо виходячи з умови (25):  $S_0^c = 16 \text{ мм}$ .

Товщина втулки біля основи фланця визначається за формулою (26), якщо  $\beta_1^c = 1$ :

$$S_1^c = 1 \cdot 16 = 16 \text{ мм}.$$

Висоту втулки визначимо за формулою:

$$h_g^c = 0,5 \cdot \sqrt{D_1 \cdot (S_0^c - c')} = 0,5 \cdot \sqrt{3200 \cdot (16 - 1,5)} = 108 \text{ мм}.$$

Еквівалентна товщина стінки втулки:  $S_{екв}^c = S_0^c = 16 \text{ мм}$ .

Діаметр болтової окружності визначається за формулою (27):

$$D_o^c = 3200 + 2 \cdot (2 \cdot 16 + 30 + 6) = 3336 \text{ мм}.$$

Зовнішній діаметр фланця знаходимо за формулою (28), якщо  $a = 58$  мм:

$$D_n^c = 3336 + 58 = 3394 \text{ мм.}$$

Зовнішній діаметр прокладки за (29), де  $e = 41$  мм, тоді:

$$D_{nn}^c = 3336 - 41 = 3295 \text{ мм.}$$

Середній діаметр прокладки за формулою (30):

$$D_{cn}^c = 3295 - 25 = 3270 \text{ мм.}$$

Кількість болтів, необхідна для забезпечення герметичності, знайдемо за формулою (31), якщо крок розміщення болтів:

$$t_{ui}^c = 5 \cdot d_o^c = 5 \cdot 30 = 150 \text{ мм,}$$

тоді кількість болтів буде рівна:

$$n_o^c = \frac{3,14 \cdot 3336}{150} = 70.$$

Товщину фланця визначимо за формулою (32), якщо  $\lambda_\phi^c = 0,38$ :

$$h_\phi^c = 0,38 \cdot \sqrt{3200 \cdot 16} = 86 \text{ мм.}$$

Розрахункова довжина болта визначається за формулою (33). Для фланців типу “шип-паз”, при товщині прокладки  $h_n^c = 3$  мм, відстань між опорною поверхнею головки болта і гайки визначається за формулою (34), тоді:

$$l_{ob}^c \approx 2 \cdot (86 + 3) = 178 \text{ мм,}$$

а діаметр отвору під болт  $d_c' = 33$  мм, тоді, розрахункова довжина болта:

$$l_o^c = 178 + 0,28 \cdot 33 = 187,24 \text{ мм.}$$

Приймаємо:  $l_o^c = 190$  мм.

Навантаження на фланець, яке виникає унаслідок дії тиску:

$$F_D^c = \frac{p_{атм} \cdot \pi \cdot (D_{cn}^c)^2}{4} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 3,27^2}{4} = 0,839 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Реакція прокладки викликана тиском за формулою (35), якщо ефективна ширина прокладки:

$$b_0^c = 0,12 \cdot \sqrt{b_c} = 0,12 \cdot \sqrt{0,025} = 0,019 \text{ м,}$$

тоді реакція прокладки буде рівна:

$$R_n^c = 3,14 \cdot 3,27 \cdot 0,019 \cdot 2,5 \cdot 0,1 \cdot 10^6 = 0,049 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Податливість прокладки визначається за формулою (36):

$$y_n^c = \frac{1 \cdot 0,003}{2000 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 3,27 \cdot 0,025} = 0,584 \cdot 10^{-11} \text{ м/Н.}$$

Кутову податливість фланця визначаємо за (37). Попередньо визначимо:

$$\psi_1^c = 1,28 \cdot \lg \frac{D_n^c}{D_1} = 1,28 \cdot \lg \frac{3,394}{3,2} = 0,033,$$

$$\lambda_{\phi}^{c'} = \frac{h_{\phi}^c}{\sqrt{D_1 \cdot S_{екв}^c}} = \frac{0,086}{\sqrt{3,2 \cdot 0,016}} = 0,38,$$

$$\psi_2^c = \frac{D_n^c + D_1}{D_n^c - D_1} = \frac{3,394 + 3,2}{3,394 - 3,2} = 33,99,$$

тоді, за (38):

$$\nu_c = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot 0,38 \cdot \left(1 + \frac{0,033 \cdot 0,086^2}{0,016^2}\right)} = 0,6.$$

З урахування коефіцієнтів, визначених вище, кутова податливість фланця становитиме:

$$y_{\phi}^c = [1 - 0,6 \cdot (1 + 0,9 \cdot 0,38)] \cdot \frac{33,99}{0,086^3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 0,52 \cdot 10^{-7} \text{ 1/Н м.}$$

Лінійна податливість болтів за формулою (39):

$$y_{\sigma}^c = \frac{0,19}{1,99 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 5,4 \cdot 10^{-4} \cdot 70} = 5,524 \cdot 10^{-11} \text{ м/Н.}$$

Коефіцієнт жорсткості фланцевого з'єднання:

$$k_{жс}^c = \frac{y_{\sigma}^c + 0,5 \cdot y_{\phi}^c \cdot (D_{\sigma}^c - D_1 - S_{екв}^c)(D_{\sigma}^c - D_{cn}^c)}{y_n^c + y_{\sigma}^c + 0,5 \cdot y_{\phi}^c \cdot (D_{\sigma}^c - D_{cn}^c)^2} =$$

$$= \frac{2,526 \cdot 10^{-11} + 0,5 \cdot 0,52 \cdot 10^{-7} \cdot (3,336 - 3,2 - 0,016)(3,336 - 3,27)}{0,584 \cdot 10^{-11} + 2,526 \cdot 10^{-11} + 0,5 \cdot 0,52 \cdot 10^{-7} \cdot (3,336 - 3,27)^2} = 1,601$$

Зусилля, що виникає у фланці внаслідок температурних деформацій, визначаємо за формулою (40), якщо:

$$t_{\phi}^c = 0,96 \cdot t_1 = 0,96 \cdot 93,52 = 89,779^{\circ}\text{C},$$

$$t_{\sigma}^c = 0,95 \cdot t_1 = 0,95 \cdot 93,52 = 88,844^{\circ}\text{C},$$

тоді:

$$F_t^c = \frac{2,526 \cdot 10^{-11} \cdot 70 \cdot 5,4 \cdot 10^{-4} \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{0,584 \cdot 10^{-11} + 2,526 \cdot 10^{-11} + 0,5 \cdot 0,52 \cdot 10^{-7} \cdot (3,336 - 3,27)^2} \times \\ \times (15,7 \cdot 10^{-6} \cdot 89,779 - 12,2 \cdot 10^{-6} \cdot 88,844) = 0,429 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

Зусилля, що виникає у болтах в умовах монтажу, знаходимо відповідно до співвідношення (41), у якому:

$$F_{\sigma 1}^{c'} = k_{\text{жс}}^c \cdot F_{\text{д}}^c + R_n^c = 1,601 \cdot 0,839 \cdot 10^6 + 0,049 \cdot 10^6 = 1,139 \cdot 10^6 \text{ Н};$$

$$F_{\sigma 1}^{c''} = 0,5 \cdot 3,14 \cdot 3,27 \cdot 0,019 \cdot 35 \cdot 10^6 = 3,414 \cdot 10^6 \text{ Н};$$

$$F_{\sigma 1}^{c'''} = 0,4 \cdot [\sigma]_{\sigma}^{20} \cdot n_{\sigma}^c \cdot f_{\sigma}^c = 0,4 \cdot 140 \cdot 10^6 \cdot 70 \cdot 5,4 \cdot 10^{-4} = 2,117 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

Приймаємо:  $F_{\sigma 1}^c = F_{\sigma 1}^{c''} = 3,414 \cdot 10^6 \text{ Н}.$

Зусилля на болти під час роботи апарату:

$$F_{\sigma 2}^c = F_{\sigma 1}^c + (1 - k_{\text{жс}}^c) \cdot F_{\text{д}}^c + F_t^c = 3,414 + (1 - 1,601) \cdot 0,839 + 0,429 = 3,339 \text{ МН}.$$

Умова міцності болтів у період монтажу за співвідношенням (43)

$$\frac{F_{\sigma 1}^c}{n_{\sigma}^c \cdot f_{\sigma}^c} = \frac{3,414 \cdot 10^6}{70 \cdot 5,4 \cdot 10^{-4}} = 87,672 \cdot 10^6 \text{ Па} < 210 \text{ МПа} -$$

умова виконується.

Умова міцності болтів під час роботи за співвідношенням (44):

$$\frac{F_{\sigma 2}^c}{n_{\sigma}^c \cdot f_{\sigma}^c} = \frac{3,329 \cdot 10^6}{70 \cdot 5,4 \cdot 10^{-4}} = 88,333 \cdot 10^6 \text{ Па} < 202 \text{ МПа} -$$

умова міцності виконується.

Умова міцності прокладки відповідно до співвідношення (45), у якому:

$$F_{\sigma \text{ max}}^c = \max \left\{ \begin{matrix} F_{\sigma 1}^c \\ F_{\sigma 2}^c \end{matrix} \right\} = F_{\sigma 2}^c = 3,339 \cdot 10^6 \text{ Н},$$

тоді:

$$\frac{F_{\sigma \max}^c}{\pi \cdot D_{cn}^c \cdot b_c} = \frac{3,339 \cdot 10^6}{3,14 \cdot 3,27 \cdot 0,025} = 13,008 \cdot 10^6 \text{ Па} < 130 \text{ МПа} -$$

умова міцності виконується.

Умова міцності втулки фланця, обмеженої розміром  $S_0$ , визначається за формулою (46),  $f_{\phi}^c = 1$  при  $x_c = \frac{h_{\phi}^c}{\sqrt{D_1 \cdot S_0^c}} = \frac{0,108}{\sqrt{3,2 \cdot 0,016}} = 0,478$ , тоді:

$$T_{\text{н}}^c = \frac{(D_{\text{н}}^c)^2 \cdot \left(1 + 8,55 \cdot \lg \frac{D_{\text{н}}^c}{D_1}\right) - D_1^2}{\left(1,05 \cdot D_1^2 + 1,945 \cdot (D_{\text{н}}^c)^2\right) \cdot \left(\frac{D_{\text{н}}^c}{D_1} - 1\right)} =$$

$$= \frac{3,394^2 \cdot \left(1 + 8,55 \cdot \lg \frac{3,394}{3,2}\right) - 3,2^2}{\left(1,05 \cdot 3,2^2 + 1,945 \cdot 3,394^2\right) \cdot \left(\frac{3,394}{3,2} - 1\right)} = 1,89.$$

Значення крутного моменту знаходимо зі співвідношення (49), у якому:

$$M_0^{c'} = 0,5 \cdot (D_{\sigma}^c - D_{cn}^c) \cdot F_{\sigma 1}^c = 0,5 \cdot (3,336 - 3,27) \cdot 3,314 \cdot 10^6 = 0,109 \cdot 10^6 \text{ Н м},$$

$$M_0^{c''} = 0,5 \cdot \left[ (D_{\sigma}^c - D_{cn}^c) \cdot F_{\sigma 2}^c + (D_{cn}^c - D_1 - S_{\text{екв}}^c) \cdot F_{\text{д}}^c \right] \cdot \frac{[\sigma]_{\delta}^{20}}{[\sigma]_{\delta}^c} =$$

$$= 0,5 \cdot \left[ (3,336 - 3,27) \cdot 3,339 \cdot 10^6 + (3,27 - 3,2 - 0,016) \cdot 0,839 \cdot 10^6 \right] \cdot \frac{140 \cdot 10^6}{135 \cdot 10^6} =$$

$$= 0,138 \cdot 10^6 \text{ Н м}.$$

Приймаємо:  $M_0^c = M_0^{c''} = 0,138 \cdot 10^6 \text{ Н м}$ ,  $D_1^* = D_1 = 3,2 \text{ м}$ , тому що:

$$20 \cdot S_1^c = 20 \cdot 0,016 = 0,32 \text{ м} < 4,5 \text{ м}.$$

З урахуванням параметрів, визначених вище, за (48) знайдемо:

$$\sigma_1^c = \frac{0,89 \cdot 0,138 \cdot 10^6 \cdot 0,6}{3,2 \cdot (0,016 - 0,0015)^2} = 109,53 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Підставимо отримане значення в (47) і отримаємо:

$$\sigma_0^c = 1 \cdot 109,53 = 109,53 \text{ МПа}.$$

$$\sigma_t^c = \frac{p_{ам} \cdot D_1}{2 \cdot (S_0^c - c')} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 3,2}{2 \cdot (0,016 - 0,0015)} = 11,034 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

$$\sigma_m^c = \frac{p_{ам} \cdot D_1}{4 \cdot (S_0^c - c')} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 3,2}{4 \cdot (0,016 - 0,0015)} = 5,517 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Розрахуємо напруження у втулці та перевіримо виконання умови міцності:

$$\begin{aligned} & \sqrt{(\sigma_0^c + \sigma_m^c)^2 + (\sigma_t^c)^2 - (\sigma_0^c + \sigma_m^c) \cdot \sigma_t^c} = \\ & = \sqrt{(109,53 + 5,517)^2 + 11,034^2 - (109,53 + 5,517) \cdot 11,034} = 109,946 \text{ МПа} < \\ & < 570 \text{ МПа} - \text{умова міцності виконується.} \end{aligned}$$

Умову герметичності фланцевого з'єднання розраховуємо за формулою (50), у якій:

$$\begin{aligned} \sigma_\kappa^c &= M_0^c \cdot \left[ 1 - \nu_c \cdot (1 + 0,9 \cdot \lambda_\phi^{c'}) \right] \cdot \frac{\psi_2^c}{D_1 \cdot (h_\phi^c)^2} = \\ &= 0,138 \cdot 10^6 \cdot \left[ 1 - 0,6 \cdot (1 + 0,9 \cdot 0,38) \right] \cdot \frac{33,99}{3,2 \cdot 0,086^2} = 38,608 \cdot 10^6 \text{ Па,} \end{aligned}$$

тоді умова міцності матиме вигляд:

$$\theta_c = \frac{38,608 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} \cdot \frac{3,2}{0,086} = 0,0072 \text{ рад} < 0,013 \text{ рад} - \text{умова}$$

виконується.

#### 4.4.7.3 Розрахунок фланцевого з'єднання циркуляційної труби

Розрахункова схема фланцевого з'єднання зображена на рисунку 9  
та 10.

Товщину стінки втулки фланця приймаємо виходячи з умови (25):  
 $S_0^{um} = 12 \text{ мм.}$

Товщина втулки біля основи фланця визначається за формулою (26), у якій  $\beta_1^{um} = 1$ , тоді:

$$S_1^{um} = 1 \cdot 12 = 12 \text{ мм.}$$

Висоту втулки визначимо за формулою:

$$h_6^{um} = 0,5 \cdot \sqrt{D_2 \cdot (S_0^{um} - c')} = 0,5 \cdot \sqrt{900 \cdot (12 - 1,5)} = 49 \text{ мм.}$$

Еквівалентна товщина стінки втулки:  $S_{екв}^{um} = S_0^{um} = 12 \text{ мм.}$

Діаметр болтової окружності визначається за формулою (27):

$$D_6^{um} = 900 + 2 \cdot (2 \cdot 12 + 20 + 6) = 1000 \text{ мм.}$$

Зовнішній діаметр фланця знаходимо за формулою (28), у якій  $a_{um} = 40 \text{ мм.}$

$$D_n^{um} = 1000 + 40 = 1040 \text{ мм.}$$

Зовнішній діаметр прокладки за (29), якщо  $e_{um} = 30 \text{ мм.}$

$$D_{nn}^{um} = 1000 - 30 = 970 \text{ мм.}$$

Середній діаметр прокладки визначаємо за формулою (30):

$$D_{cn}^{um} = 970 - 20 = 950 \text{ мм.}$$

Кількість болтів, необхідна для забезпечення герметичності за (31), якщо крок розміщення болтів:

$$t_{uu}^{um} = 5 \cdot d_6^{um} = 5 \cdot 20 = 100 \text{ мм,}$$

тоді:

$$n_6^{um} = \frac{3,14 \cdot 1000}{100} = 31.$$

Товщину фланця визначимо за формулою (32), якщо  $\lambda_\phi^{um} = 0,38$ :

$$h_\phi^{um} = 0,38 \cdot \sqrt{900 \cdot 12} = 39 \text{ мм.}$$

Розрахункова довжина болта визначається за формулою (33), у якій  $l_{об}^{um}$  знаходимо з (34), якщо  $h_n^{um} = 2 \text{ мм,}$

$$l_{об}^{um} \approx 2 \cdot (39 + 2) = 82 \text{ мм.}$$

У формулі (33) діаметр отвору під болт  $d_{um}' = 23 \text{ мм,}$  тоді розрахункова довжина болта:

$$l_6^{um} = 82 + 0,28 \cdot 23 = 88,44 \text{ мм.}$$



Приймаємо  $l_6^{um} = 90$  мм.

Навантаження на фланець, яке виникає внаслідок дії тиску:

$$F_D^{um} = \frac{p_{um} \cdot \pi \cdot (D_{cn}^{um})^2}{4} = \frac{0,122 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 0,95^2}{4} = 0,086 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Реакція прокладки викликана тиском за (35), якщо и ефективна ширина прокладки:

$$b_0^{um} = 0,12 \cdot \sqrt{b_{um}} = 0,12 \cdot \sqrt{0,02} = 0,017 \text{ м,}$$

тоді реакція рівна:

$$R_n^{um} = 3,14 \cdot 0,95 \cdot 0,017 \cdot 2,5 \cdot 0,122 \cdot 10^6 = 0,015 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Податливість прокладки визначається за формулою (36):

$$y_n^{um} = \frac{1 \cdot 0,002}{2000 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 0,95 \cdot 0,02} = 1,676 \cdot 10^{-11} \text{ м/Н.}$$

Кутова податливість фланця за (37), якщо:

$$\psi_1^{um} = 1,28 \cdot \lg \frac{D_n^{um}}{D_2} = 1,28 \cdot \lg \frac{1,04}{0,9} = 0,08,$$

$$\lambda_{\phi}^{um} = \frac{h_{\phi}^{um}}{\sqrt{D_2 \cdot S_{екв}^{um}}} = \frac{0,039}{\sqrt{0,9 \cdot 0,012}} = 0,38,$$

$$\psi_2^{um} = \frac{D_n^{um} + D_2}{D_n^{um} - D_2} = \frac{1,04 + 0,9}{1,04 - 0,9} = 13,857,$$

за формулою (38):

$$\nu_{um} = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot 0,38 \cdot \left(1 + \frac{0,08 \cdot 0,039^2}{0,012^2}\right)} = 0,613,$$

тоді:

$$y_{\phi}^{um} = \left[1 - 0,613 \cdot (1 + 0,9 \cdot 0,38)\right] \cdot \frac{13,857}{0,039^3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 0,207 \cdot 10^{-6} \text{ 1/Н м.}$$

Лінійна податливість болтів за (39):

$$y_6^{um} = \frac{0,09}{1,99 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4} \cdot 31} = 6,208 \cdot 10^{-11} \text{ м/Н.}$$

Коефіцієнт жорсткості фланцевого з'єднання:

$$k_{\text{жс}}^{um} = \frac{y_{\bar{o}}^{um} + 0,5 \cdot y_{\bar{o}}^{um} \cdot (D_{\bar{o}}^{um} - D_2 - S_{екв}^{um}) \cdot (D_{\bar{o}}^{um} - D_{cn}^{um})}{y_n^{um} + y_{\bar{o}}^{um} + 0,5 \cdot y_{\bar{o}}^{um} \cdot (D_{\bar{o}}^{um} - D_{cn}^{um})^2} =$$

$$= \frac{6,208 \cdot 10^{-11} + 0,5 \cdot 0,207 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,9 - 0,012) \cdot (1 - 0,95)}{1,676 \cdot 10^{-11} + 6,208 \cdot 10^{-11} + 0,5 \cdot 0,207 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,95)^2} = 1,533$$

Зусилля, що виникає у фланці внаслідок температурних деформацій, визначимо за формулою (40), якщо:

$$t_{\phi}^{um} = 0,96 \cdot t_{\kappa} = 0,96 \cdot 95,875 = 92,04^{\circ}\text{C},$$

$$t_{\bar{o}}^{um} = 0,95 \cdot t_{\kappa} = 0,95 \cdot 95,875 = 91,081^{\circ}\text{C},$$

тоді:

$$F_t^{um} = \frac{6,208 \cdot 10^{-11} \cdot 31 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4} \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{1,676 \cdot 10^{-11} + 6,208 \cdot 10^{-11} + 0,5 \cdot 0,207 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,95)^2} \times$$

$$\times (15,7 \cdot 10^{-6} \cdot 92,04 - 12,2 \cdot 10^{-6} \cdot 91,081) = 0,089 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

Зусилля, що виникає у болтах в умовах монтажу із співвідношення (41), у якому:

$$F_{\bar{o}1}^{um'} = k_{\text{жс}}^{um} \cdot F_D^{um} + R_n^{um} = 1,533 \cdot 0,086 \cdot 10^6 + 0,015 \cdot 10^6 = 0,147 \cdot 10^6 \text{ Н};$$

$$F_{\bar{o}1}^{um''} = 0,5 \cdot 3,14 \cdot 0,95 \cdot 0,017 \cdot 35 \cdot 10^6 = 0,887 \cdot 10^6 \text{ Н};$$

$$F_{\bar{o}1}^{um'''} = 0,4 \cdot [\sigma]_{\bar{o}}^{20} \cdot n_{\bar{o}} \cdot f_{\bar{o}} = 0,4 \cdot 140 \cdot 10^6 \cdot 31 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4} = 0,478 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

Приймаємо:  $F_{\bar{o}1}^{um} = F_{\bar{o}1}^{um''} = 0,887 \cdot 10^6 \text{ Н}.$

Зусилля на болти під час роботи апарату:

$$F_{\bar{o}2}^{um} = F_{\bar{o}1}^{um} + (1 - k_{\text{жс}}^{um}) \cdot F_D^{um} + F_t^{um} = 0,887 \cdot 10^6 + (1 - 1,533) \cdot 0,086 \cdot 10^6 +$$

$$+ 0,089 \cdot 10^6 = 0,93 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

Умова міцності болтів у період монтажу за (43):

$$\frac{F_{\bar{o}1}^{um}}{n_{\bar{o}}^{um} \cdot f_{\bar{o}}^{um}} = \frac{0,887 \cdot 10^6}{31 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4}} = 121,757 \cdot 10^6 \text{ Па} < 210 \text{ МПа} - \text{умова}$$

виконується.

Умова міцності болтів під час роботи за (44):

$$\frac{F_{\delta 2}^{um}}{n_{\delta}^{um} \cdot f_{\delta}^{um}} = \frac{0,93 \cdot 10^6}{31 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4}} = 127,66 \cdot 10^6 \text{ Па} < 202 \text{ МПа} -$$

умова міцності виконується.

Умова міцності прокладки за (45), якщо:

$$F_{\delta \max}^{um} = \max \left\{ \begin{matrix} F_{\delta 1}^{um} \\ F_{\delta 2}^{um} \end{matrix} \right\} = F_{\delta 2}^{um} = 0,93 \cdot 10^6 \text{ Н},$$

тоді:

$$\frac{F_{\delta \max}^{um}}{\pi \cdot D_{cn}^{um} \cdot b_{um}} = \frac{0,93 \cdot 10^6}{3,14 \cdot 0,95 \cdot 0,02} = 15,588 \cdot 10^6 \text{ Па} < 130 \text{ МПа} -$$

умова міцності виконується.

Умова міцності втулки фланця, обмеженої розміром  $S_0^{um}$ , за співвідношенням (46), якщо  $f_{\phi}^{um} = 1$ , при:  $x_{um} = \frac{h_{\epsilon}^{um}}{\sqrt{D_2 \cdot S_0^{um}}} = \frac{0,049}{\sqrt{0,9 \cdot 0,012}} = 0,472$ ,

тоді:

$$\begin{aligned} T_n^{um} &= \frac{\left(D_n^{um}\right)^2 \cdot \left(1 + 8,55 \cdot \lg \frac{D_n^{um}}{D_2}\right) - D_2^2}{\left(1,05 \cdot D_2^2 + 1,945 \cdot \left(D_n^{um}\right)^2\right) \cdot \left(\frac{D_n^{um}}{D_2} - 1\right)} = \\ &= \frac{1^2 \cdot \left(1 + 8,55 \cdot \lg \frac{1}{0,9}\right) - 0,9^2}{\left(1,05 \cdot 0,9^2 + 1,945 \cdot 1^2\right) \cdot \left(\frac{1}{0,9} - 1\right)} = 1,871, \end{aligned}$$

значення крутного моменту  $M_0^{um}$  знайдемо за співвідношенням (49), якщо:

$$M_0^{um'} = 0,5 \cdot \left(D_{\delta}^{um} - D_{cn}^{um}\right) \cdot F_{\delta 1}^{um} = 0,5 \cdot (1 - 0,95) \cdot 0,887 \cdot 10^6 = 0,022 \cdot 10^6 \text{ Н м},$$

$$\begin{aligned} M_0^{um''} &= 0,5 \cdot \left[ \left(D_{\delta}^{um} - D_{cn}^{um}\right) \cdot F_{\delta 2}^{um} + \left(D_{cn}^{um} - D_1 - S_{екв}^{um}\right) \cdot F_D^{um} \right] \cdot \frac{[\sigma]_{\delta}^{20}}{[\sigma]_{\delta}^{um}} = \\ &= 0,5 \cdot \left[ (1 - 0,95) \cdot 0,93 \cdot 10^6 + (0,95 - 0,9 - 0,012) \cdot 0,086 \cdot 10^6 \right] \cdot \frac{140 \cdot 10^6}{135 \cdot 10^6} = \\ &= 0,026 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Приймаємо:  $M_0^{um} = M_0^{um''} = 0,026 \cdot 10^6 \text{ Н м}$ ,  $D_2^* = D_2 = 0,9 \text{ м}$ , тому що:

$$20 \cdot S_1^{um} = 20 \cdot 0,012 = 0,24 \text{ м} < 1,2 \text{ м}.$$

З урахуванням параметрів, визначених вище, знайдемо значення напруження в оболонці, викликане крутним моментом за формулою (48):

$$\sigma_1^{um} = \frac{1,871 \cdot 0,026 \cdot 10^6 \cdot 0,613}{0,9 \cdot (0,012 - 0,0015)^2} = 154,922 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Підставимо отримане значення в (47) і отримаємо:

$$\sigma_0^{um} = 1 \cdot 154,922 = 154,922 \text{ МПа}.$$

$$\sigma_t^{um} = \frac{p_{um} \cdot D_2}{2 \cdot (S_0^{um} - c')} = \frac{0,122 \cdot 10^6 \cdot 0,9}{2 \cdot (0,012 - 0,0015)} = 5,229 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

$$\sigma_m^{um} = \frac{p_{um} \cdot D_2}{4 \cdot (S_0^{um} - c')} = \frac{0,122 \cdot 10^6 \cdot 0,9}{4 \cdot (0,012 - 0,0015)} = 2,614 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Розрахуємо напруження у втулці та перевіримо виконання умови міцності:

$$\begin{aligned} & \sqrt{(\sigma_0^{um} + \sigma_m^{um})^2 + (\sigma_t^{um})^2 - (\sigma_0^{um} + \sigma_m^{um}) \cdot \sigma_t^{um}} = \\ & = \sqrt{(154,992 + 2,614)^2 + 5,229^2 - (154,992 + 2,614) \cdot 5,229} = 154,988 \text{ МПа} < \\ & < 570 \text{ МПа} - \text{умова міцності виконується.} \end{aligned}$$

Умова герметичності фланцевого з'єднання за формулою (50), якщо:

$$\begin{aligned} \sigma_\kappa^{um} &= M_0^{um} \cdot \left[ 1 - \nu_{um} \cdot (1 + 0,9 \cdot \lambda_\phi^{um'}) \right] \cdot \frac{\psi_2^{um}}{D_2 \cdot (h_\phi^{um})^2} = \\ &= 0,026 \cdot 10^6 \cdot \left[ 1 - 0,613 \cdot (1 + 0,9 \cdot 0,38) \right] \cdot \frac{13,857}{0,9 \cdot 0,039^2} = 46,678 \cdot 10^6 \text{ Па}, \end{aligned}$$

тоді умова герметичності матиме вигляд:

$$\theta_{um} = \frac{46,678 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} \cdot \frac{0,9}{0,039} = 0,0054 \text{ рад} < 0,013 \text{ рад} - \text{умова}$$

виконується.

#### 4.4.8 Перевірка несучої спроможності обичайки випарного апарату під дією опорних навантажень

Вихідні дані:

- абсолютний тиск гріючої пари  $p_{гн} = 0,4$  МПа;
- абсолютний тиск навколишнього середовища  $p_{атм} = 0,1$  МПа;
- діаметр гріючої камери в районі подачі гріючої пари  $D' = 2,14$  м;
- діаметр сепаратора  $D_1 = 3,2$  м;
- товщина стінки гріючої камери  $S_{гк} = 4$  мм;
- товщина стінки сепаратора  $S_c = 12$  мм;
- відстань від опори до найближчого зварного шва (для гріючої камери)  $f_{гк} = 0,02$  м;
- відстань від опори до найближчого зварного шва (для сепаратора)  $f_c = 0,53$  мм;
- кількість опор гріючої камери  $n'_{гк} = 3$ ;
- кількість опор сепаратора  $n'_c = 3$ ;
- допустиме напруження матеріалу фланця  $[\sigma]_{опр} = 467$  МПа;
- вага випарного апарату  $G_{в.а} = 250000$  Н;
- коефіцієнт для визначення граничного напруження в опорі  $K_2 = 1,2$ ;
- коефіцієнт запасу міцності за границею текучості  $n_m = 1,5$ .

##### 4.4.8.1 Перевірка несучої спроможності обичайки гріючої камери під дією опорних навантажень

Умова застосування формул [21]:

$$\frac{S_{гк} - c'}{D'} = \frac{0,004 - 0,0015}{2,14} = 1,168 \cdot 10^{-3} < 0,05 \quad - \quad \text{умова}$$

виконується.

Навантаження на одну опору:

$$F_{оп}^{зк} = \frac{G_{г.а}}{n'_{зк}} = \frac{250000}{3} = 83,3 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

За знайденим навантаженням обираємо стандартні опори типу I, з наступними розмірами:  $c = 65 \text{ мм}$ ,  $c_1 = 160 \text{ мм}$ ,  $d_{\phi} = 36 \text{ мм}$ ,  $g' = 256 \text{ мм}$ ,  $b_4 = 310 \text{ мм}$ ,  $h_1 = 360 \text{ мм}$ ,  $h_2 = 24 \text{ мм}$ ,  $K = 35$ ,  $K_1 = 80$ ,  $l_1 = 230 \text{ мм}$ ,  $S_1^{оп} = 12 \text{ мм}$ . Опора приварюється до апарату разом із підкладним листом, розміри якого:  $b_2 = 400 \text{ мм}$ ,  $b_3 = 820 \text{ мм}$ ,  $S_2^{оп} = 20 \text{ мм}$  [21].

Відстань між точкою прикладання зусиль та підкладним листом:

$$e_1 = \frac{5 \cdot l_1}{6} = \frac{5 \cdot 0,23}{6} = 0,192 \text{ м.}$$

Загальне мембранне напруження [22]:

$$\sigma_{my}^{зк} = \frac{p_{зк} \cdot D'}{2 \cdot (S_{зк} - c')} = \frac{0,4 \cdot 10^6 \cdot 2,14}{2 \cdot (0,004 - 0,0015)} = 171,2 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Коефіцієнт міцності зварного шва вибираємо в залежності від співвідношення:

$$\sqrt{D' \cdot S_{зк}} = \sqrt{2,14 \cdot 0,004} = 0,093 \text{ м} > f_{зк} = 0,02 \text{ мм},$$

тоді приймаємо:  $\varphi_{зк} = 1$ .

Умови застосування розрахункових формул при наявності підкладного листа [21]:

$$\frac{S_{зк} - c'}{D'} = \frac{0,004 - 0,0015}{2,14} = 1,168 \cdot 10^{-3} < 0,05 \quad - \quad \text{умова}$$

виконується;

$$0,2 \cdot h_1 = 0,2 \cdot 360 = 72 \text{ мм} < g' = 256 \text{ мм} \quad - \quad \text{умова}$$

виконується;

$$S_2^{оп} = 20 \text{ мм} > S_{зк} = 4 \text{ мм} - \text{умова виконується.}$$

Загальні мембранні напруження опор в обичайці [21]:

$$\sigma_m^{зк} = \sigma_{my}^{зк} = 171,2 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Коефіцієнт, що враховує ступінь навантаження загальними напруженнями:

$$v_2^{\varepsilon\kappa} = \frac{K_2}{n_m} \cdot \frac{\sigma_m^{\varepsilon\kappa}}{[\sigma] \cdot \varphi_{\varepsilon\kappa}} = \frac{1,2}{1,5} \cdot \frac{171,2 \cdot 10^6}{467 \cdot 10^6 \cdot 1} = 0,293.$$

Коефіцієнт, що відображає відношення місцевих мембранних напружень до місцевих напружень вигину. Обирається в залежності від попереднього коефіцієнту і становить:  $v_1^{\varepsilon\kappa} = 0,4$ .

Коефіцієнт для визначення граничного напруження [21]:

$$K_1^{\varepsilon\kappa} = \frac{1 + 3 \cdot v_1^{\varepsilon\kappa} \cdot v_2^{\varepsilon\kappa}}{3 \cdot (v_1^{\varepsilon\kappa})^2} \cdot \left( \pm \sqrt{\frac{9 \cdot (v_1^{\varepsilon\kappa})^2 \cdot [1 - (v_2^{\varepsilon\kappa})^2]}{(1 + 3 \cdot v_1^{\varepsilon\kappa} \cdot v_2^{\varepsilon\kappa})^2}} + 1 - 1 \right) =$$

$$= \frac{1 + 3 \cdot 0,4 \cdot 0,293}{3 \cdot 0,4^2} \cdot \left( \pm \sqrt{\frac{9 \cdot 0,4^2 \cdot (1 - 0,293^2)}{(1 + 3 \cdot 0,4 \cdot 0,293)^2}} + 1 - 1 \right) = 0,879.$$

Граничне напруження обичайки в місці приварки опорної лапи.

$$[\sigma]_{опр}^{\varepsilon\kappa} = K_1^{\varepsilon\kappa} \cdot [\sigma]_{опр} \cdot \frac{n_m}{K_2} = 0,879 \cdot 467 \cdot 10^6 \cdot \frac{1,5}{1,2} = 513,116 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Геометричні параметри конструктивних вузлів приєднання опорних лап до обичайки з підкладним листом [21]:

$$u = \ln \frac{D'}{2 \cdot (S_{\varepsilon\kappa} - c')} = \ln \frac{2,14}{2 \cdot (0,004 - 0,0015)} = 6,059;$$

$$y = \ln \frac{h_1}{D'} = \ln \frac{0,36}{2,14} = -1,782;$$

$$y_1 = \ln \frac{b_4}{D'} = \ln \frac{0,31}{2,14} = -1,932;$$

$$y_2 = \ln \frac{b_3}{D'} = \ln \frac{0,82}{2,14} = -0,959.$$

Значення коефіцієнта  $K_8$  знаходимо графічним способом, попередньо розрахувавши наступні співвідношення:

$$\frac{b_3}{D'} = \frac{0,82}{2,14} = 0,383;$$

$$\frac{D'}{2 \cdot (S_{зк} - c')} = \frac{2,14}{2 \cdot (0,004 - 0,0015)} = 428,$$

тоді:  $K_8 = 0,18$ .

Допустиме зусилля у вузлі приварки опорної лапи до обичайки з підкладним листом [21]:

$$\begin{aligned} [F]_{оп}^{зк} &= \frac{[\sigma]_{оп}^{зк} \cdot b_3 \cdot (S_{зк} - c')^2}{K_8 \cdot (e_1 - S_2)} = \\ &= \frac{513,116 \cdot 10^6 \cdot 0,82 \cdot (0,004 - 0,0015)^2}{0,18 \cdot (0,192 - 0,02)} = 84,939 \cdot 10^3 \text{ Н.} \end{aligned}$$

Умову несучої спроможності опорного вузла підкладного листа за співвідношенням (51):

$$83,3 \text{ кН} < 84,839 \text{ кН} - \text{умова виконується.}$$

#### 4.4.8.2 Перевірка несучої спроможності обичайки сепаратора під дією опорних навантажень

Розрахункова схема наведена на рисунку 11.

Умова застосування формул:

$$\frac{S_c - c'}{D_1} = \frac{0,012 - 0,0015}{3,2} = 3,281 \cdot 10^{-3} < 0,05 \quad - \quad \text{умова}$$

виконується.

Навантаження на одну опору визначаємо за формулою:

$$F_{оп}^c = \frac{G_{г.а}}{n'_c} = \frac{250000}{3} = 83,3 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

За знайденим навантаженням обираємо стандартні опори типу I, з наступними розмірами:  $c = 65 \text{ мм}$ ,  $c_1 = 160 \text{ мм}$ ,  $d_\phi = 36 \text{ мм}$ ,  $g' = 256 \text{ мм}$ ,  $b_4 = 310 \text{ мм}$ ,  $h_1 = 360 \text{ мм}$ ,  $h_2 = 24 \text{ мм}$ ,  $K = 35$ ,  $K_1 = 80$ ,  $l_1 = 230 \text{ мм}$ ,  $S_1^{оп} = 12 \text{ мм}$ . Опора приварюється до апарату без підкладного листа [21].



Відстань між точкою прикладання зусиль та обичайкою апарату:

$$e_1 = \frac{5 \cdot l_1}{6} = \frac{5 \cdot 0,23}{6} = 0,192 \text{ м.}$$

Загальне мембранне напруження:

$$\sigma_{my}^c = \frac{p_{амм} \cdot D_1}{2 \cdot (S_c - c')} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 3,2}{2 \cdot (0,012 - 0,0015)} = 15,238 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Коефіцієнт міцності зварного шва вибираємо в залежності від співвідношення:

$$\sqrt{D_1 \cdot S_c} = \sqrt{3,2 \cdot 0,012} = 0,196 \text{ м} < f_c = 0,53 \text{ мм,}$$

тоді приймаємо:  $\varphi_c = 95$ .

Загальні мембранні напруження опор в обичайці [21]:

$$\sigma_m^c = \sigma_{my}^c = 15,238 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Коефіцієнт, що враховує ступінь навантаження загальними напруженнями:

$$v_2^c = \frac{K_2}{n_m} \cdot \frac{\sigma_m^c}{[\sigma] \cdot \varphi_c} = \frac{1,2}{1,5} \cdot \frac{15,238 \cdot 10^6}{467 \cdot 10^6 \cdot 0,95} = 0,027.$$

Коефіцієнт, що відображає відношення місцевих мембранних напружень до місцевих напружень вигину. Вибирається в залежності від попереднього коефіцієнту і становить:  $v_1^c = 0,3$ .

Коефіцієнт для визначення граничного напруження [21]:

$$K_1^c = \frac{1 + 3 \cdot v_1^c \cdot v_2^c}{3 \cdot (v_1^c)^2} \cdot \left( \pm \sqrt{\frac{9 \cdot (v_1^c)^2 \cdot [1 - (v_2^c)^2]}{(1 + 3 \cdot v_1^c \cdot v_2^c)^2} + 1} - 1 \right) =$$

$$= \frac{1 + 3 \cdot 0,3 \cdot 0,027}{3 \cdot 0,3^2} \cdot \left( \pm \sqrt{\frac{9 \cdot 0,3^2 \cdot (1 - 0,027^2)}{(1 + 3 \cdot 0,3 \cdot 0,027)^2} + 1} - 1 \right) = 1,256.$$

Граничне напруження обичайки в місці приварки опорної лапи.

$$[\sigma]_{опр}^c = K_1^c \cdot [\sigma]_{опр} \cdot \frac{n_m}{K_2} = 1,256 \cdot 467 \cdot 10^6 \cdot \frac{1,5}{1,2} = 733,19 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Геометричні параметри конструктивних вузлів приєднання опорних лап до обичайки без підкладного листа:

$$u = \ln \frac{D_1}{2 \cdot (S_c - c')} = \ln \frac{3,2}{2 \cdot (0,012 - 0,0015)} = 5,026;$$

$$y = \ln \frac{h_1}{D_1} = \ln \frac{0,36}{3,2} = -2,185;$$

$$y_1 = \ln \frac{b_4}{D_1} = \ln \frac{0,31}{3,2} = -2,334.$$

Значення коефіцієнта  $K_7$  знаходимо за графіком [21], попередньо визначивши:

$$\frac{h_1}{D_1} = \frac{0,36}{3,2} = 0,113;$$

$$\frac{D_1}{2 \cdot (S_c - c')} = \frac{3,2}{2 \cdot (0,012 - 0,0015)} = 152,$$

тоді  $K_7 = 0,83$ .

Допустиме зусилля у вузлі приварки опорної лапи до обичайки без підкладного листа [21]:

$$\begin{aligned} [F]_{оп}^c &= \frac{[\sigma]_{оп}^c \cdot h_1 \cdot (S_c - c')^2}{K_7 \cdot e_1} = \\ &= \frac{733,19 \cdot 10^6 \cdot 0,36 \cdot (0,012 - 0,0015)^2}{0,83 \cdot 0,192} = 182,607 \cdot 10^3 \text{ Н.} \end{aligned}$$

Умову несучої спроможності опорного вузла перевіримо за формулою (51):

$$83,3 \text{ кН} < 182,6077 \text{ кН} - \text{умова виконується.}$$

#### 4.5 Рекомендації з ремонту, монтажу та експлуатації апаратів в установці

Монтаж випарного апарату починається із установки корпусу гріючої камери на три опори типу «лапа». До корпусу гріючої камери, за допомогою фланцевого з'єднання, приєднується днище гріючої камери, а також

приварюється штуцер для вводу гріючої пари (разом із укріплюючим кільцем). До верхньої частини гріючої камери приєднується царга і еліптична кришка.

Монтаж сепаратора розпочинаємо із з'єднання верхньої і нижньої царг, її встановлення на трьох опорах типу «лапа» і з'єднання з гріючою камерою. Потім приєднується кришку апарату і (за допомогою двох фіксуючих кілець) фіксується зливна труба бризкоуловлювача. Далі приєднується днище, яке встановлюється на циліндричну опору.

Завершальним етапом монтажу апарату є з'єднання гріючої камери і сепаратора за допомогою циркуляційної труби і перевірка апарату на герметичність.

Усі складальні одиниці випарного апарату з'єднуються між собою за допомогою фланцевих з'єднань типу «шип-паз».

У апараті, перед відкриттям, доводять тиск до атмосферного, з апарату видаляють робоче середовище, після чого його пропарюють водяною парою. Після пропарювання апарат промивають водою. В деяких випадках пропарювання і промивання чергують кілька разів [15].

Пропарений і промитий апарат від'єднують від усіх комунікацій глухими заглушками, що встановлюються у фланцевих з'єднаннях штуцерів. Установку кожної заглушки і наступне її зняття реєструють в спеціальному журналі.

Корпус апарату як зовні, так і з середини підлягає візуальному огляду. Виявлення дефектів корпусу, що вимагає високої кваліфікації, включає візуальний огляд для визначення загального стану корпусу і ділянок, схильних до найбільшого зносу; вимірювання залишкової товщини корпусу за допомогою ультразвукових дефектоскопів; перевірку на щільність зварних швів і роз'ємних з'єднань і т. д [15].

Нещільні зварні шви вирубують, зачищають і заварюють. Зношені штуцери і люки вирізають і замінюють новими з обов'язковою установкою зміцнюючих кілець. Бажано, щоб зміцнюючі кільця нових штуцерів мали дещо більший діаметр, ніж старі: це дозволяє приварювати їх в новому місці. Ремонту піддають усі штуцери.

Під час кожного ремонту вимірюють фактичну товщину стінки корпусу випарного апарату [15].

Гріюча камера має жорстку конструкцію, тобто нерухома трубна решітка жорстко з'єднана з корпусом. Основний їх недолік – неможливість механічного очищення внутрішньої поверхні корпусу і зовнішньої поверхні труб від бруду і відкладень.

Візуальному огляду підлягають тільки кришки, кінці і внутрішні канали труб, штуцери на корпусі і кришках. Дефекти інших частин гріючої камери можуть бути виявлені тільки при опресуванні.

Терміни і зміст ревізій і ремонтів визначають, виходячи з конкретних експлуатаційних умов. Необхідність в достроковому ремонті може бути обумовлена різким погіршенням теплообміну (відповідно до технологічної карти). У такому разі можливе забруднення внутрішніх або зовнішніх поверхонь (чи обох одночасно) труб. Зношування трубних решіток практично виключається через їх велику товщину [15].

При проведенні ремонту з трубного і міжтрубного просторів через штуцери видаляють їх вміст. Далі протягом часу, визначеного фізико-хімічними властивостями робочого середовища, їх промивають водою, потім пропарюють. Завдяки промиванню і пропарюванню відбувається підготовка апарату до відкриття, видалення вибухо- і пожежонебезпечних або токсичних речовин, розбору і очищення поверхонь від відкладень. Слід зазначити, що промивання – єдино можливий спосіб видалення відкладень із зовнішніх поверхонь труб і внутрішніх поверхонь корпусу. Тому промиванню міжтрубного простору гріючої камери необхідно приділяти особливу увагу. Бажано промивати апарати гарячою водою, що підігрівається парою. Аналогічно промивають трубний простір [15].

Після промивання апарат від'єднують від комунікації глухими заглушками і приступають до його розбирання.

Фактичну товщину стінки і днищ вимірюють шляхом висвердлювання отворів, а також за допомогою приладів для ультразвукового вимірювання товщини стінки.

Особливої ретельності вимагає перевірка стану кінців труб в трубних решітках. Перевірку проводять за допомогою візуального огляду, вимірюванням діаметру та товщини стінки частин апарату, а також опресуванням. Складно визначити стан розвальцьованого з'єднання; його оцінюють за результатами вимірювання внутрішнього діаметру розвальцьованого кінця труби.

Дефекти, які не можна виявити під час візуального огляду і вимірювань, виявляють опресовуванням міжтрубного і трубного просторів [15].

Трубу, що на практиці вийшла з ладу, заглушають з двох кінців металевими конусними пробками. Число таких труб не повинне перевищувати 10% від загального числа труб в пучку, інакше значно зросте гідравлічний опір і помітно зменшиться поверхня теплообміну.

Необхідність ремонту корпусу встановлюють за результатами вимірювання товщини і перевірки зварних швів.

Перед повною зборкою апарату слід проводити опресовування міжтрубного простору. При цьому виявиться нещільність в корпусі, в місцях з'єднання труб з трубними ґратами, а також зношені теплообмінні труби (при появі в них води). Апарат остаточно опресовують після закриття кришок. З апарату, що витримав випробування, зливають воду, а потім знімають заглушки [15].

#### 4.6 Висновки

1. Дану конструкцію рекомендовано використовувати на цьому виробництві тому, що: конструкцію можна швидко розібрати та зібрати; осад можна видаляти механічним способом; має місце легкий доступ до внутрішньої поверхні гріючих труб: забезпечується висока швидкість процесу випарювання.

2. Проведені розрахунки теплового та матеріального балансу, конструктивний розрахунок апарата, визначено основні габаритні розміри та максимальні напруження в апараті.

3. Розраховані геометричні розміри складальних одиниць апарату.

4. Визначено матеріали, з яких виготовляється апарат.

5. Надані рекомендації з монтажу та експлуатації

6. Отримані результати задовольняють необхідні робочі умови.

.

## 5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

### 5.1 Резюме

**Бізнес ідея:** ідея розвитку

**Мета наукової розробки:** збільшення прибутку виробництва за рахунок значного збільшення продуктивності та інтенсивності процесу випарювання при збереженні якості продукту і незначному збільшенні енерговитрат.

Таблиця 5.1 Техніко-економічні показники (для заданих параметрів):

Апарат, призначений для упарювання розчину лимонної кислоти	
<b>Концентрація розчину, % (мас):</b>	
початкова	15
кінцева	65
<b>Продуктивність, кг/с:</b>	
по вихідному продукту	2,89
по кінцевому продукту	0,667
по випареній волозі	2,223
<b>Площа поверхні теплообміну, м<sup>2</sup></b>	250
<b>Середовище у апараті:</b>	
у сепараторі	розчин лимонної кислоти, водяна пара
у міжтрубному просторі	насичена водяна пара
у трубному просторі	розчин лимонної кислоти
<b>Тиск, МПа:</b>	
у сепараторі	0,08
у міжтрубному просторі	0,4

у трубному просторі	0,1
<b>Температура, С°:</b>	
у сепараторі	94
у міжтрубному просторі	144
у трубному просторі	102
<b>Габаритні розміри, мм:</b>	
довжина	7490
ширина	3520
висота	13500
Маса, кг:	15000

**Тема:** Модернізація апарату для виробництва лимонної кислоти.

**Назва:** Випарний апарат з виносною гріючою камерою з природною циркуляцією.

**Суб'єкт замовлення:** юридична, фізична особа або фізична особа підприємець.

**Об'єкт дослідження:** Лінія виробництва лимонної кислоти з розробкою випарного апарату з виносною гріючою камерою з природною циркуляцією. Випуск лимонної кислоти.

**Місце розробки в інноваційному ланцюжку цінності:** розробка.

**Плановий обсяг впровадження технологічної лінії:** для впровадження достатньо замінити апарат старої конструкції на запропоновану нову конструкцію випарного апарату з виносною гріючою камерою. Час заміни апарату з урахуванням зварювання деталей та монтажу 4-5 діб. Можлива заміна апаратів на лінії у період планових ремонтів.



**Продукт:** готова очищена лимонна кислота. Завдяки новій конструкції, отримуємо більшу швидкість потоку речовини, не впливаючи на якість етапів очистки та концентрування випарного апарату. Таким чином збільшилась продуктивність на 25%, а енергетичні витрати збільшились всього на 5% (За один цикл отримуємо 1800кг лимонної кислоти, з удосконаленою конструкцією за один цикл маємо 2250кг. За 1 день 8 циклів.

**Технологія:** конструкція випарного апарату для концентрування та випарювання лимонної кислоти.

**Достатність сировинної бази:**

для виготовлення корпусу та деталей, що контактують з розчином, який упарюється використовується сталь 1X21H5T (діапазон цін 25-47 грн/кг: середня ціна за 1 кілограм 36 грн), опори виготовляються зі сталі 45X (діапазон цін 13-46 грн/кг: середня ціна за 1 кілограм 27 грн). Вона є широко поширеною і застосовуваною маркою сталі в Україні. Сталь 1X21H5T та 45X виготовляється в достатній кількості і постійно присутня на ринку. Також має ряд аналогів як в Україні та і в країнах Європи.

**Кваліфікація персоналу:** всі категорії персоналу (спеціалісти, службовці, робітники).

**Ринок збуту:**

Провідні світові та українські розробники та виробники випарних апаратів для харчової промисловості

Таблиця 5.2 Провідні світові компанії виробники випарних установок

Назва компанії	Країна
UNIPEKTIN	Болгарія
Wiegand	Німеччина
Theseus Lab	Франція
Prognat EnTwTo Ltd.	Австрія

BOSCH	Німеччина
Siemens AG	Німеччина
TPS	Україна
ТЕХНОЛОГ	Україна
Тепломаш	Росія
Alfa Laval	Росія
Dremel	США
DeWALT	США
Vestel	Турція
Black & Decker	США
Miele	Німеччина

**Конкурентні переваги:** задана конструкція дозволяє задати виробництву збільшені об'єми випуску готової продукції, гарантує високу якість продукту в порівнянні з іншими її аналогами.

## 5.2 Аналіз зовнішнього та внутрішнього середовища

### Таблиця 5.3 Можливості і загрози зовнішнього середовища

Загрози	Можливості
<b>Зовнішнє середовище</b>	
<b>Політика</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Податки</li> <li>- Нестабільна політична ситуація в</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Низький рівень контролю з боку влади</li> <li>- Можливість виходу на іноземний</li> </ul>

<p>країні</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Постійна зміна законодавства;</li> <li>- Відсутність інвестицій</li> <li>- Спад зацікавленості з виникненням політичної нестабільності</li> </ul>	<p>ринок;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Програми підтримки малого бізнесу(біотехнологічної галузі)</li> </ul>
<b>Демографія</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Деградація населення</li> <li>- Зміна ринку праці</li> <li>- Безробіття</li> <li>- Низький рівень життя</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Великий асортимент продуктів харчової промисловості спрямовані на різні верстви населення</li> <li>- Широкий вибір спеціалістів</li> <li>- Велика чисельність населення, як потенційних споживачів;</li> <li>- Дешева робоча сила</li> <li>- Нові робочі місця</li> </ul>
<b>Географія</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Високі тарифи на комунальні послуги</li> <li>- Кункуренція із продукцією країї-сусідів</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Використання в будь-яких регіонах</li> <li>- Забезпеченість вітчизняною сировиною, що значно дешевша за імпорту</li> <li>- Великий вибір кваліфікованих і талановитих кадрів;</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Розташування</li> <li>- Можливість експорту</li> </ul>
<b>Економіка</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Корупція</li> <li>- Існування залежності фінансового стану від зовнішніх факторів</li> <li>- Нестабільність курсу валют, що призводить до знецінення гривні</li> <li>- Падіння ВВП</li> <li>- Інфляція</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Дешевизна виробництва</li> <li>- Вихід на європейський ринок</li> <li>- Відсутність конкурентів</li> <li>- Стабільний розвиток харчової промисловості</li> </ul>
<b>Науково-технічний прогрес</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Низький рівень науково-технічного прогресу в Україні;</li> <li>- Необхідність модернізації в майбутньому</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Високо-кваліфіковані професіонали</li> <li>- Власна розробка</li> <li>- Наявність різноманітних і дієвих безкоштовних/дешевих методів і засобів реклами</li> </ul>
<b>Культура</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Зниження культурного та просвітницького рівня у покоління, що є основною робочою силою</li> <li>- Різноманітні соціальні групи і</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Покращення культурно просвітницького рівня у молодого покоління (якісна заміна кадрів)</li> <li>- Підвищення культурно-освітнього рівня населення</li> </ul>

класи	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Індустріалізація суспільства</li> <li>- Престижність професії</li> </ul>
-------	---

Таблиця 5.4 Переваги і недоліки внутрішнього середовища

Постачальник	
Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Нема проблем із постачальниками</li> <li>- Імпорт сировини</li> <li>- Доступність сировини</li> <li>- Стандартні миючі та дезінфікуючі засоби</li> <li>- Дешева сировина</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Складнощі з транспортом імпоротної сировини</li> <li>- Дороге обладнання</li> <li>- Необхідність встановлення обладнання для вентиляції та очистки повітря</li> <li>- Достатні потреби в воді відповідної якості та електроенергії</li> </ul>
Виробник	
Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Нескладний технологічний процес</li> <li>- Мала чисельність персоналу</li> <li>- Можлива часткова зайнятість</li> <li>- Сучасна технологія</li> <li>- Вчасні ремонтні роботи</li> <li>- Пошук нових технологій</li> <li>- Розширення спеціалізації</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Довгий виробничий цикл</li> <li>- Великі амортизаційні затрати</li> <li>- Висока кваліфікація персоналу</li> <li>- Необхідність змінності</li> <li>- Витрати на ремонти та оновлення основних фондів</li> </ul>
Посередник	
Переваги	Недоліки

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Можлива реклама через посередників</li> <li>- Можливість продажу в різноманітних точках роздрібно́ї торгівлі</li> <li>- Можливість поширення як готового продукту так і підготовленої сировини</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Збільшення кінцевої вартості</li> <li>- Довгострокові договори про виробництво та постачання</li> </ul>
<b>Споживач</b>	
<b>Переваги</b>	<b>Недоліки</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Виробництво проводиться як під замовлення так і на продаж</li> <li>- Багатофункціональність новітньої розробки</li> <li>- Можливість використання у багатьох сферах</li> <li>- Рівень стандартизації та уніфікації</li> <li>- Високий рівень автоматизації</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Мала кількість споживачів</li> <li>- Дорогий ремонт</li> <li>- Великі габаритні розміри</li> </ul>
<b>Конкурент</b>	
<b>Переваги</b>	<b>Недоліки</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Мала конкуренція в Україні</li> <li>- НТП в біотехнологічній галузі</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Можливість легкого входу в бізнесСвітова конкуренція з іншими країнами</li> </ul>

### Аналіз потенційного ринку збуту і конкурентного середовища за методом квадрату Бове

Таблиця 5.5 Квадрат Бове

Лідер	Наступаючі
Wiegand (Німеччина)	Theseus Lab (Франція) UNIPEKTIN (Болгарія)

<p>Готові обійти</p> <p><u>Власна інновація</u></p> <p><u>Vestel</u> (Турція)</p>	<p>Пртизани</p> <p>ТЕХНОЛОГ (Україна)</p> <p>Тепломаш (Росія)</p> <p>Alfa Laval (Росія)</p>

За методом квадрату Бове запропоновану інженерну розробку можна віднести до зони “Готові обійти”, тому що завдяки інноваційній ідеї розробка може конкурувати з лідерами на ринку.

#### **Місце розробки у системі цінностей підприємства за методом Бостонської матриці**

Таблиця 5.6 – Характеристика можливих товарів підприємства

№	Назва підприємства	Обсяг продажу	Доля на ринку (%)
1	Інновація	Низький	висока ( $\geq 10\%$ )
2	ООО ТЕХНОЛОГ	Низький	низька ( $\leq 10\%$ )
3	TPS	Високий	низька ( $\leq 10\%$ )
4	ТЕПЛОМАШ	Високий	низька ( $\leq 10\%$ )

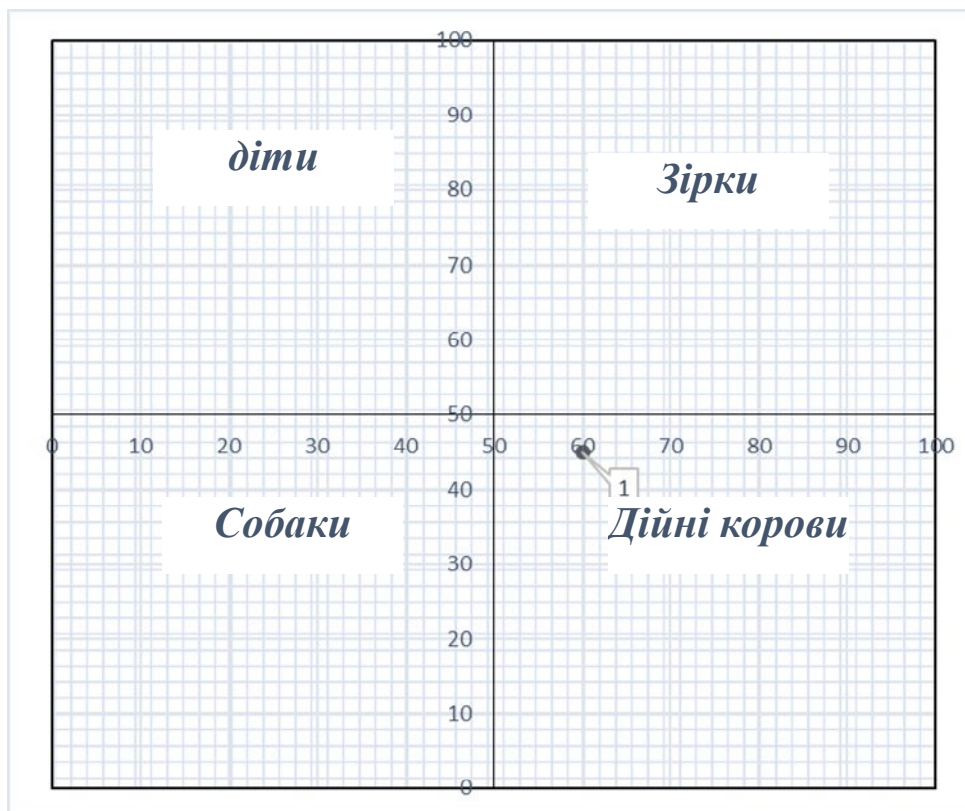


Рис.5.1 Бостонська матриця

### 5.3. Метод Шонфільда. Визначення ключових факторів успіху проекту.

Таблиця 5.7 Порівняння за методом Шонфільда

№ п/п	Показники	Коефіцієнт важливості	бали	
			Випарна установка НК (1)	Випарна установка АК (2)
1	Поверхня Випарювання	0,2	5	5
2	Робочий тиск	0,1	4	4
3	Діапазон температур	0,2	4	5
4	Габаритні розміри	0,2	5	4
5	Продуктивність	0,2	5	4
	$\Sigma$		4,2	3,2



Випарна установка НК (1) – Випарна установка нова конструкція,  
 Випарна установка АК (2) – Випарна установка аналогова конструкція.

$$\Sigma_1 = 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,2 = 4,2,$$

$$\Sigma_2 = 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 = 3,2.$$

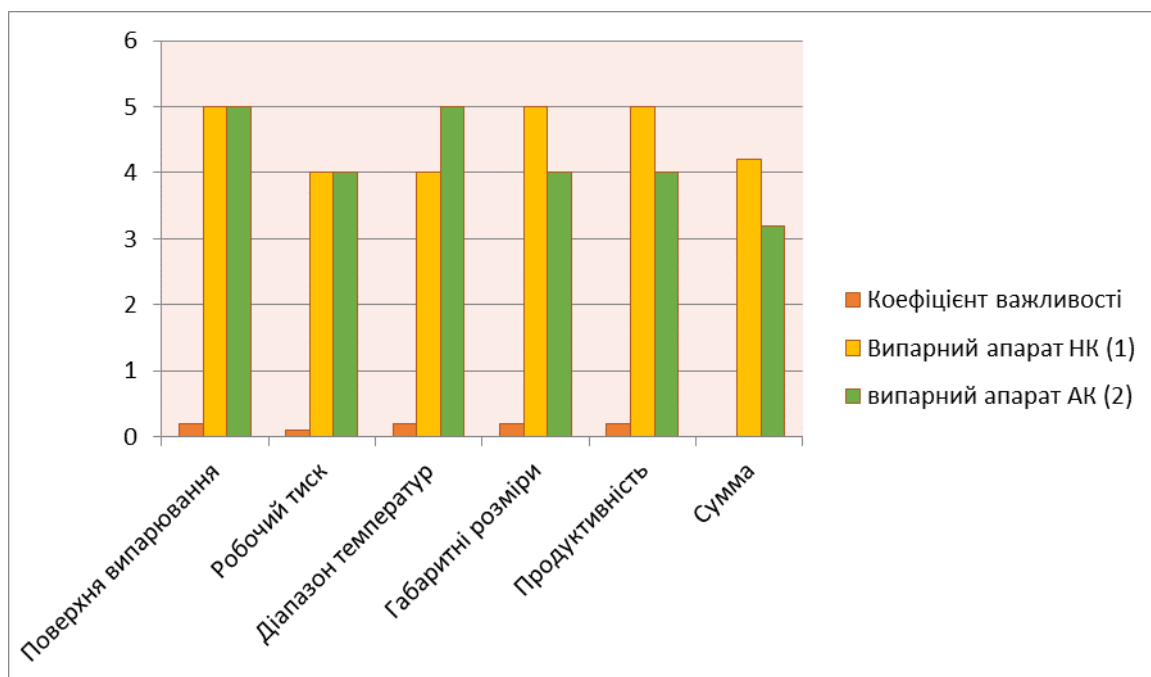


Рис.5.2 Діаграма Шонфільда

Можна зробити висновок, що Випарна установка нової конструкції має на порядок вищі показники у порівнянні з найближчим аналогом. Ключовими факторами для успішної реалізації проекту виступають якісні характеристики удосконаленої конструкції теплообмінника пластинчастого, такі як:

- поверхня випарювання
- діапазон температур
- продуктивність
- габаритні розміри
- робочий тиск.

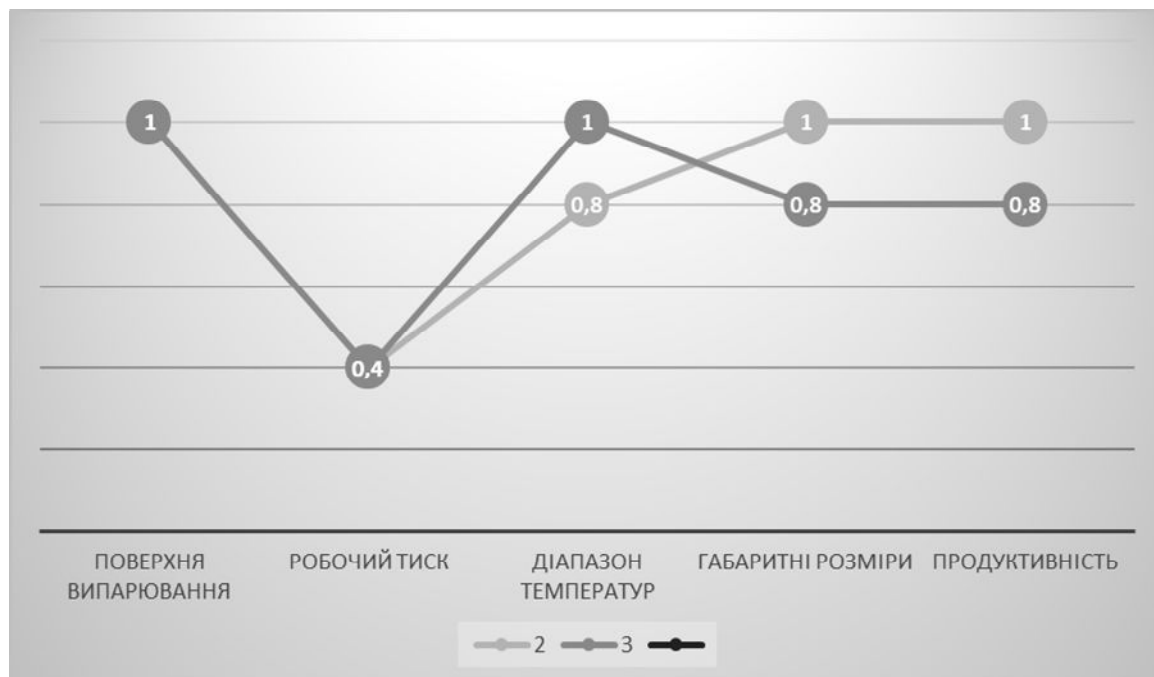


Рис. 5.3 Фактори з врахуванням важливості параметру

### Анкета для споживачів

1. З яких джерел ви отримуєте інформацію про необхідну вам обладнання? \_\_\_\_\_
2. Чи підтримуєте ви українське виробництво?
  - A. Так
  - B. Ні
3. Чи був у вас досвід придбання подібного обладнання?  
\_\_\_\_\_
4. Габаритні розміри апарату?
  - Висота \_\_\_\_\_
  - Ширина \_\_\_\_\_
5. Необхідна площа поверхні теплообміну?  
\_\_\_\_\_
6. Продуктивність по вихідному продукту?  
\_\_\_\_\_
7. Розбірна конструкція?
  - C. Так
  - D. Ні
8. Потужність?  
\_\_\_\_\_
9. Необхідність використання у чистих приміщеннях?
  - A. Так
  - B. Ні
10. Необхідність у допомозі з монтажем
  - A. Так
  - B. Ні
11. Як проводите обслуговування обладнання?
  - A. Свій персонал;

В. Послуги інших фірм;

С. Обслуговування за субконтрактом

12. Безперервне виробництво?

А.Так

В.Ні

13. Якими хімічними засобами відбувається очищення обладнання?

---

14. Ваші побажання та зауваження

---

5.4 Оцінка ринкових позицій  
Договір N245173  
на виконання науково-дослідних робіт

*м. Київ*

*"17" вересня 2018 року*

1. Предмет Договору

1.1. Замовник доручає, а Виконавець бере на себе зобов'язання з виконання науково-дослідної роботи на тему "Модернізація апарату для виробництва лимонної кислоти ", а Замовник зобов'язується прийняти виконану роботу та оплатити її.

1.2. Наукові, економічні та інші вимоги до науково-дослідної продукції, яка є результатом виконання предмета цього Договору, викладені у Технічному завданні на науково-дослідну роботу (додаток 1), що є невід'ємною частиною цього Договору.

1.3. Використання результатів науково-дослідної роботи Виконавцем може провадитись лише за письмовим погодженням Замовника. Використовуючи результати науково-дослідної роботи Виконавець зобов'язаний зазначити, що робота виконувалась за рахунок коштів Державного бюджету України.

2. Ціна Договору та порядок розрахунків

2.1. Ціна Договору на виконання науково-дослідної роботи, становить 200 000 грн. Операція звільнена від оподаткування відповідно до підпункту 5.1.22 пункту 5.1 статті 5 Закону України "Про податок на додану вартість".

2.2. Джерело фінансування - Державний бюджет України на 2018 рік.

2.3. Ціну договору та обсяг виконуваних робіт може бути змінено залежно від реального фінансування видатків з Державного бюджету України.

3. Порядок здавання та приймання робіт

3.1. Перелік наукової та іншої документації, що підлягає оформленню та здаванню Виконавцем Замовнику на окремих етапах виконання та після закінчення виконання робіт, визначаються Технічним завданням.

3.2. По завершенню виконання робіт по етапу Виконавець не пізніше, ніж через 3 робочих дні надає Замовнику акт здавання-приймання виконаних робіт за відповідним етапом робіт.

3.3. По завершенні робіт Виконавець не пізніше, ніж через 5 робочих днів надає Замовнику акт здавання-приймання науково-дослідної роботи, додавши до нього:

3.3.1. акт здавання-приймання науково-дослідної продукції;

3.3.2. науковий звіт;

3.3.3. комплекти науково-дослідної та звітної документації, яка передбачена розділом 6 Технічного завдання та умовами цього Договору;

3.3.4. витяг з протоколу засідання науково-технічної ради Виконавця з висновком про відповідність виконаної роботи Технічному завданню на науково-дослідну роботу або висновок незалежної наукової експертизи результатів науково-дослідної роботи;

3.3.5. затверджені Виконавцем акти на списання придбаних та використаних матеріалів, а також копії договорів та актів про надання послуг співвиконавців.

3.4. Замовник протягом 5 днів з дня одержання відповідних Актів та документів, зобов'язаний направити Виконавцеві підписаний Акт або мотивовану відмову від приймання робіт.

3.5. У випадку мотивованої відмови Замовника, Сторонами складається двосторонній акт, в якому обґрунтовуються причини неприйняття робіт та (по можливості) із переліком необхідних доробок та термінів їх виконання.

3.6. Якщо в процесі виконання роботи з'ясується недоцільність подальшого її проведення у відповідності до вимог Технічного завдання Виконавець повинен за вимогою Замовника припинити виконання робіт за Договором, повідомивши про це Замовника у триденний термін після припинення роботи.

Після припинення виконання робіт Сторони повинні протягом 3 календарних днів розглянути питання про порядок проведення остаточного розрахунку та оплати Замовником фактично виконаних Виконавцем робіт на момент припинення виконання робіт. Відповідне рішення оформлюється протоколом Сторін.

3.7. У разі дострокового виконання робіт Замовник має право достроково прийняти та оплатити їх за ціною, що вказана в цьому Договорі.

#### 4. Відповідальність Сторін

4.1. У разі порушення строків, визначених у Календарному плані, Виконавець за вимогою Замовника сплачує пеню у розмірі ставки Національного банку України за кожен день прострочення, але не більше 5 % суми перерахованих коштів.

4.2. Виконавець несе відповідальність за:

4.2.1 відповідність науково-дослідної продукції в цілому за своїми науковими і технічними параметрами вимогам Технічного завдання на науково-дослідну роботу;

4.2.2 за цільове використання коштів Державного бюджету України та фактичні витрати відповідно до бухгалтерського обліку та законодавства.

4.3. Виконавець не має права змінювати розподіл коштів між статтями витрат Планової калькуляції кошторисної вартості витрат у межах узгодженої планової калькуляції без письмової згоди Замовника.

4.4. У зв'язку з відсутністю або затримкою фінансування з Державного бюджету України можлива зміна за погодженням між Замовником і Виконавцем терміну дії цього Договору. Усі зміни оформляються додатковою угодою до цього Договору, що є його невід'ємною частиною.

4.5. Виконавець зобов'язаний своїми засобами і за свій рахунок у погодженні із Замовником строки ліквідувати зазначені в відповідних Актах недоліки і дефекти, які були допущені з його вини.

4.6. У разі невиконання робіт за цим Договором з вини Виконавця останній повертає Замовнику всі раніше сплачені кошти з виплатою відсотків в розмірі діючої на той час ставки рефінансування НБУ.

4.7. У разі неприйняття Замовником зробленої Виконавцем роботи в цілому через невідповідність її Технічному завданню на науково-дослідну роботу, Виконавцю сплачується тільки вартість робіт, прийнятих Замовником.

4.8. Сплата штрафних санкцій не звільняє Виконавця від виконання умов Договору.

4.9. Сторони звільняються від відповідальності за невиконання або неналежне виконання зобов'язань, якщо це невиконання або неналежне виконання викликане обставинами, що не залежать від волі Сторін і знаходяться поза їхньою компетенцією, а саме: воєнними діями, пожежами, стихійними лихами, техногенними аваріями, страйками, прийняття законів або інших нормативно-правових актів, що роблять неможливим виконання умов цього Договору.

4.10. Замовник має право в односторонньому порядку розірвати Договір за умови порушення норм, якщо у зазначені Замовником строки Виконавцем не були ліквідовані недоліки та дефекти, які були допущені з його вини в процесі виконання робіт за даним Договором.

4.11. Замовник не несе відповідальності перед Виконавцем за несвоєчасне виконання грошових зобов'язань поточного року у разі затримки фінансування з Державного бюджету України.

## 5. Строк дії Договору

5.1. Цей Договір вважається укладеним і набирає чинності з моменту його підписання Сторонами і діє до «17» вересня 2019 року, а в частині розрахунків - до повного виконання Сторонами своїх зобов'язань відповідно до умов цього Договору.



ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ  
на виконання робіт

Від Бокова Т.В.

Від Іванова І.І.

Старший інженер

Науковий керівник Петров П.П.

Київ - 2018

1. Загальні положення

*Модернізація апарату для виробництва лимонної кислоти*

1.1. Замовник: Боков Т.В.

1.2. Головний виконавець: Іванов І.І.

1.3. Співвиконавці: Петров П.П.

1.4. Комплексний тематичний план науково-дослідних робіт, що фінансуються за рахунок коштів загального фонду Державного бюджету, на 2018 рік.

1.5. Плановий початок робіт 17.10.2018, планове закінчення робіт 17.12.2018.

2. Основні наукові та нормативні вимоги до виконання науково-дослідної роботи

2.1 Вимоги до рівня проведення досліджень: Рівень досліджень, що будуть проводитися, відповідатиме світовим та вітчизняним вимогам для цього наукового напрямку, що буде підтверджено публікаціями у провідних фахових виданнях.

2.2 Вимоги до якості наукової продукції, створеної при проведенні науково-дослідної роботи. Якість результатів досліджень, що будуть проводитися, відповідатиме світовим та вітчизняним вимогам для цього напрямку, що буде підтверджено контрольними вимірюваннями у незалежних лабораторіях.

2.3 Вимоги до форми представлення результатів досліджень, декларування створюваної наукової продукції про відповідність її чинним нормативним документам України. Результати наукових досліджень роботи будуть представлені у формі заключного звіту.

### 3. Призначення та мета створення науково-дослідної продукції

3.1 *Об'єкт дослідження або розроблення:* Випарний апарат з виносною грюючою камерою.

3.2 *Мета роботи:* Створення прототипу випарного апарату з виносною грюючою камерою – якісно нового апарату для інтенсифікації процесу випарювання концентрованого розчину лимонної кислоти.

### 4.Склад та етапи виконання роботи

Таблиця 5.8 Етапи виконання науково- дослідної роботи

N	Назва роботи (етапу)	Очікувані результати за етапами	Термін виконання		Звітні документи та наукова продукція, що підлягають здачі замовнику в кінці етапу
			Початок	Кінець	
1	Розробка концепції прототипу теплообмінника пластинчастого	Концепції прототипу випарного апарату	17.10.2018	10.12.2018	Проміжний звіт
2	Математичні розрахунки	Отримані результати	21.11.2018	28.11.2018	
3	Комп'ютерна візуалізація проекту	3D модель	29.11.2018	01.12.2018	Проміжний звіт
4	Створення прототипу теплообмінника пластинчастого	Прототип теплообмінника пластинчастий	01.12.2018	03.12.2018	
5	Випробування на реальній конструкції	Отримані результати	04.12.2018	09.12.2018	Кінцевий звіт

5. Перелік наукової та іншої документації, що надається після закінчення роботи

- проміжні звіти за етапами;
- заключний звіт з теми;
- Довідка про оцінку науково-технічного рівня результатів НДР;

- Довідка про виконання вимог чинних державних стандартів;
- Акт прийняття закінченої НДР.

6. Порядок розгляду та приймання науково-дослідної роботи

Робота приймається поетапно і в цілому по завершенні.

Джерела фінансування науково-дослідної розробки (НДР)

Таблиця 5.9 Джерела фінансування НДР

№ п/п	Джерело фінансування	Пріоритет
1	Система грантів за підтримкою Державного фонду фундаментальних досліджень  (напрямок - наукові основи перспективних технологій)	1
2	Державні фонди спеціального призначення	2
3	Держбюджет	3
4	Приватні підприємства	4
5	Власні кошти	5

5.5 Оцінка ризиків та страхування розробки  
Таблиця 5.10 Оцінка ризиків та страхування розробки

№ п/п	Ризик	Ймовірність настання	Вплив на результат
1	відсутність або недостатність коштів для самофінансування	висока	зупинка процесу впровадження
2	відсутність реального джерела зовнішнього інвестування	середня	зменшення прибутку
3	утрата джерела фінансування проекту в процесі його реалізації	середня	зменшення прибутку
4	невідповідність цін, передбачених бізнес-планом, та реальних ринкових цін	низька	зменшення прибутку/збільшення прибутку
5	недостатнє ресурсне забезпечення виробництва	низька	зменшення прибутку
6	помилковий вибір цільового сегмента ринку, стратегії продажу продукту	середня	вилучення продукту
7	неефективна реклама	низька	зменшення прибутку
8	недостатньо налагоджена система взаємодії з партнерами та контрагентами	середня	зменшення прибутку
9	створення продуктів-замінників	висока	зменшення вартості продукції
10	низький рівень патентного захисту	середня	втрата інтелектуальної власності

11	низький рівень збереження комерційних таємниць	середня	втрата інтелектуальної власності
12	непередбачене збільшення ринкових цін на ресурси	висока	зменшення прибутку
13	витрати на непередбачені бізнес-планом заходи	низька	зменшення прибутку
14	виплати за термінові роботи	низька	зменшення прибутку
15	штрафні санкції, арбітражні виплати	середня	зменшення прибутку
16	недосягнення бажаних економічних результатів у процесі розробки та впровадження інновацій	висока	зменшення прибутку
17	перевищення кошторису витрат у процесі досліджень	середня	зменшення прибутку
18	недосягнення прогнозних технічних параметрів у процесі проведення науково-дослідних і технологічних розробок	низька	витрати на проведення додаткових експериментів
19	виникнення небажаних економічних наслідків у процесі реалізації інноваційних проектів	середня	зменшення прибутку
20	виникнення нових конкурентів	середня	витіснення з ринку

#### *Методи страхування*

1. "Покриття витрат, пов'язаних із порушенням патентних прав". Цей договір компенсує страхувальникові судові витрати по переслідуванню особи, яка порушила його виключні права на об'єкти, тобто:

- витрати щодо пред'явлення позову;

- витрати у разі пред'явлення зустрічного позову і звинувачення в недійсність патенту;
- витрати на експертизу патенту;
- витрати на повтор патенту для підкріплення позову.

2. "Покриття витрат на захист патентних прав". Цей договір захищає страхувальника у разі пред'явлення йому заяви про порушення виключних прав на об'єкти ІВ третіх осіб і покриває витрати по захисту в суді, а також витрати по виконанню судового рішення або відступні при досудовому врегулюванні претензій.

**Чисельність персоналу, що працюють на підприємстві, можна подати у вигляді наступної таблиці:**

Таблиця 5.11 Чисельність працівників

№п/п	Посада	Напрямок	Кількість
1	Генеральний директор	Управлінський, економічний	1
2	Операційний директор		1
3	Бухгалтер-економіст		1
4	Менеджер з продажу		1
5	Головний механік	Інженерно-технічний персонал	1
6	Інженер-механік		1
7	Інженер-конструктор		1
8	Механік		1
9	Оператор	Робітничий	1
10	Слюсар-ремонтник		2
11	Електромонтер		2
12	Прибиральник	Допоміжний	1
13	Водій		1
14	Охоронець		3

Таким чином, чисельність працівників на підприємстві за списком становить 18 осіб.

Управлінський, економічний та Інженерно – технічний персонал (ІТР) працюють з 8:00 до 16:00.

Графік змінності для управлінського, економічного та інженерно-технічного персоналу:

День	Пн	Вт	Ср	Чт	Пт	Сб	Нд	Пн	Вт	Ср	Чт	Пт	Сб	Нд
Зміна	Р	Р	Р	Р	Р	В	В	Р	Р	Р	Р	Р	В	В

1-а зміна триває з 8.00 до 16.00, за таким графіком працюють генеральний директор, операційний директор, бухгалтер-економіст, менеджер з продаж, головний механік, інженер-механік, інженер-конструктор, механік, слюсар-ремонтник, електромонтер та допоміжні підрозділи (окрім 2-ї зміни), таким чином явочна чисельність 1-ї зміни становить 13 працівників;

2-а зміна триває з 16.00 до 22.00, за таким графіком працює, оператор, слюсар-ремонтник, електромонтер та допоміжні підрозділи, тому явочна чисельність 2-ї зміни становить 6 працівників.

Графік змінності виглядає наступним чином:

1 зміна: 8:00 -16:00

2 зміна: 16:00-22:00

бригада/зміна	Пн	Вт	Ср	Чт	Пт	Сб	Нд	Пн	Вт	Ср	Чт	Пт	Сб	Нд
І бригада	1	1	1	1	1	В	В	2	2	2	2	2	В	В
ІІ бригада	2	2	2	2	2	В	В	1	1	1	1	1	В	В

В – вихідний.

Графік змінності для охоронців має дещо інший вигляд, так як вони змушені працювати 24 години на добу. Для них існує 3 зміни по 8 годин:

1-а триває з 8:00 до 16:00

2-а – з 16:00 до 00:00

3-я – з 00:00 до 8:00

	1 зм	2 зм	3 зм	1 зм	2 зм	3 зм	1 зм	2 зм	3 зм
I		В	В		В	В		В	1
II	В		В	В		В	В		В
III	В	В		В	В		В	В	

### 5.6 Калькуляція собівартості

Складемо калькуляцію на готову продукцію підприємства. Собівартість одиниці продукції розраховується за наступною формулою:

$$C = V_{\text{пост}} + V_{\text{зм}} \cdot Q$$

Постійні витрати можна підприємства можна представити у вигляді наступної таблиці:

Таблиця 5.12 Постійні витрати підприємства

Найменування обладнання	Кількість	Початкова вартість	Амортизаційні відрахування	
			Норма амортизації, %	Сума, грн./рік
Машини і обладнання				
Основний токарний станок	1	2 500 000	10	250 000
Додаткове	1	1 200 000	10	120 000



обладнання				
<i>Будівлі і споруди</i>				
Будівля	1	1 000 000	5	50 000
<i>Транспорт</i>				
Автомобіль	1	300 000	20	60 000
<i>Нематеріальні активи</i>				
Нематеріальні активи	-	50 000	20	10000
<i>ВСЬОГО</i>	490 000			

Змінні витрати включають в себе затрати на складальні одиниці і матеріали, електроенергію, заробітну плату персоналу.

- Складальні одиниці:
  - Корпус гріючої камери, 1 шт;
  - Днище гріючої камери , 1 шт;
  - Царга гріючої камери, 1шт;
  - Кришка гріючої камери 1шт;
  - Днище сепаратора , 1 шт;
  - Царга сепаратора нижня, 1 шт;
  - Царга сепаратора верхня, 1 шт;
  - Кришка сепаратора, 2 шт;
  - Трубна решітка, 1 шт;
  - Труби гріючої камери, 520 шт;
  - Труба циркуляційна, 1 шт;
  - Опори, 5 шт;

Ціна складальних одиниць:

$$T = 150\,000 + 50\,000 + 100\,000 + 50\,000 + 75\,000 + 100\,000 + 100\,000 + 50\,000 + 2 \cdot 30\,000 + 100 \cdot 520 + 15\,000 + 3 \cdot 5000 = 817\,000 \text{ грн.}$$

Ціна складальних одиниць за рік становить

$$T_p = T \cdot V_n = 817\,000 \cdot 30 = 24\,510\,000 \text{ грн,}$$

де  $V_n$  - річний випуск продукції, од/рік.

- Матеріали: вартість упаковки на одиницю готової продукції – 15 000 грн, на рік – 450 000 грн.
- Витрати на електроенергію:
  - ціна електроенергії – 2,52 грн/кВт·год (оскільки тариф становить 168коп/кВт·год, а коефіцієнт використання електроенергії удень (з 7.00 до 23.00) становить 1,5);
  - за 1 добу роботи підприємства використовується 160 кВт енергії;
  - за рік роботи підприємства використовується 40300 кВт енергії (з урахуванням незначних витрат електроенергії в неробочі дні);
  - витрати на електроенергію за рік роботи підприємства 101 556 грн.

Таблиця 5.13 Заробітна плата працівників за місяць

№п/п	Посада	Напрямок	Кількість	ЗП на 1 працівника, грн	Всього, грн
1	Генеральний директор	Управлінський, економічний	1	50 000	40 000
2	Операційний директор		1	30 000	25 000
3	Бухгалтер-економіст		1	15 000	14 000
4	Менеджер з продажу		1	15 000	14 000
5	Головний механік		1	22 000	20 000

6	Інженер-механік	Інженерно-технічний персонал	1	17 000	15 000
7	Інженер-конструктор		1	17 000	15 000
8	Механік		1	11 000	10 000
9	Оператор	Робітничий	1	12 000	10 000
10	Слюсар-ремонтник		2	9 000	18 000
11	Електромонтер		2	9 000	16 000
12	Прибиральник	Допоміжний	1	6 000	6 000
13	Водій		1	11 000	10 000
14	Охоронець		3	9 000	27 000
Всього	269 500				

Фонд оплати праці за рік розраховуємо за наступною формулою:

$$\text{ФОП} = \text{ЗП} \cdot 1,22 \cdot 12 + \text{Пр}$$

де ЗП – заробітна плата за 1 місяць; 1,22 – коефіцієнт, який враховує нарахування 22% від ЗП до ЄСВ; 12 – кількість місяців у році; Пр – премії, що виплачуються за рік.

Звідси:

$$\text{ФОП} = 269\,500 \cdot 1,22 \cdot 12 + 40\,000 = 3\,985\,600 \text{ грн.}$$

Відповідно до розрахованих даних калькуляція собівартості річного випуску теплообмінника матиме наступний вигляд:

Таблиця 5.14 Калькуляція собівартості річного випуску ферментеру

№ п/п	Елементи	Затрати на річний випуск, грн./рік
1	Амортизація	490 000
2	Складальні одиниці	24 510 000
3	Матеріали	450 000

4	ФОП	3 985 600
5	Електроенергія	101 556
6	Інше	40 000
Всього		29 577 156

### 5.7 Методи ціноутворення

В –Вартість основних фондів 5 050 000 грн,

П –Період експлуатації 10 років,

Л –Ліквідаційна вартість 1 200 000 грн,

Пв–Постійні витрати 20 000 грн,

С – собівартість одиниці товару 817 000 грн,

Пр – величина прибутку, яку бажає отримати підприємство від реалізації одиниці товару 245 100 грн.

#### Витратний метод

Ціна розраховується, виходячи із суми постійних і змінних витрат на одиницю продукції й запланованого прибутку з урахуванням нижнього порогу ціни.

Ціна продукції на ринку:

$$Ц = С + Пр,$$

$$Ц = 817\,000 + 245\,100 = 1\,062\,100 \text{ грн.}$$

#### Параметричний метод

Корисність продукції параметричного ряду виражають чітко визначені кількісні параметри якості. Параметричні методи ціноутворення базуються на визначенні кількісної залежності між цінами і основними споживчими властивостями товару, що входить в параметричний ряд.

Питома ціна одиниці виробу Ц<sub>пит</sub>:

$$Ц_{\text{пит}} = \frac{Ц_{\text{б}}}{Х_{\text{б}}} = \frac{1\,062\,100}{1} = 1\,062\,100 \text{ грн.}$$

Питома собівартість одиниці виробу:

$$С_{\text{пит}} = \frac{С_{\text{б}}}{Х_{\text{б}}} = \frac{817\,000}{1} = 817\,000 \text{ грн,}$$

де  $Ц_{\text{б}}$ —ціна базового виробу,  $С_{\text{б}}$  – собівартість базового виробу,  $Х_{\text{б}}$ —значення основного параметра базового виробу у відповідних одиницях (вихід продукту умовно приймаємо рівним 1).

Визначення ціни нового виробу:

$$Ц_{\text{н}} = Ц_{\text{пит}} \cdot Х_{\text{н}} + Н = 1\,062\,100 \cdot 1,1 + 10\,000 = 1\,178\,310 \text{ грн,}$$

де  $Х_{\text{н}}$ —кількісне значення головного параметра нового виробу,  $Н$  – надбавки/знижки, які відображують зміни інших споживчих характеристик нового виробу 10000 грн.

Конкурентний метод

Нові продукти ціна встановлюється, виходячи з її верхньої і нижньої межі.

Верхня межа ціни ( $Ц_{\text{верх}}$ ) встановлюється з тих міркувань, що споживачу придбання нового товару вигідніше, ніж придбання аналога, що випускається на ринку

$$Ц_{\text{верх}} = Ц_{\text{а}} + E_{\text{с}} = 1\,062\,100 + 80\,000 = 1\,142\,100 \text{ грн}$$

де  $Ц_{\text{а}}$  - ціна найближчого аналога нового товару;  $E_{\text{с}}$  - споживчий ефект.

Нижня межа ціни ( $Ц_{\text{ниж}}$ ) визначається інтересами виробника і обчислюється за базисом ціни, тобто включає сукупні виробничі витрати на виготовлення продукції, плановий прибуток за встановленим рівнем рентабельності та податок на додану вартість, її можна розрахувати:

$$Ц_{\text{ниж}} = С + E_{\text{вир}} = С + П + ПДВ = 1\,062\,100 + 234\,700 = 1\,296\,800 \text{ грн}$$

де  $E_{\text{вир}}$  - ефект від виготовлення продукції (ефект виробника).

## Метод точки беззбитковості

Виражаємо точку беззбитковості (х):

$$Ц_{од} = \frac{B_{пост}}{n} + B_{зм},$$

$$Ц_{од} = \frac{490000}{30} + 986551 = 1\,002\,885 \text{ грн}$$

$B_{пост}$  – постійні витрати;

$B_{зм}$  – змінні витрати;

$n$  – кількість одиниць продукції.

Таблиця 5.15 Техніко-економічні показники підрозділу

№ п/п	Показник	Значення показників підприємства	
		Проектне підприємство	Позначення
1	Річний випуск продукції, од/рік	30	$B_n$
2	Чисельність персоналу за списком, осіб	18	$Ч_{сп_n}$
	основні та допоміжні робітники:	14	$Ч_{спр_n}$
	інженерно-технічний персонал:	4	$Ч_{спі_n}$
3	Середньорічний виробіток працівника, од/особу	2,14	$B_n / Ч_{спр_n}$
4	Капіталовкладення у проект, грн:		$K$
	всього, грн:	35 340 000	$K / B_n$
	на одиницю продукції, грн/од:	1 178 310	
5	Загальна собівартість продукту:		

	всього, грн	29 577 156	$C_{\text{зн}}$
	на одиницю продукції, грн	985 905	$C_{\text{н}}$
6	Ринкова вартість продукту, грн/од.	1 062 100	$\Pi$
7	Відносний прибуток на одиницю продукції, грн/од.	276 195	$\Pi_{\text{н}} = \Pi - C_{\text{н}}$
8	Рентабельність продукту, %	27	$P_{\text{н}} = (\Pi_{\text{н}} \cdot 100) / C_{\text{н}}$
9	Термін повернень капіталовкладень, років	4,27	$T_{\text{пов}} = K / \Pi_{\text{н}}$
10	Вартість виробничих фондів, грн У тому числі: основних; оборотних	8 278 000 5 050 000 3 228 000	$B\Phi_{\text{н}}$ $O\Phi_{\text{н}}$ $Ob\Phi_{\text{н}}$
11	Фондовіддача виробничих фондів, грн/рік	1,44	$\Phi B_{\text{н}} = (B_{\text{н}} \cdot \Pi) / B\Phi_{\text{н}}$
12	Фондомісткість, грн./грн	0,69	$\Phi \epsilon_{\text{н}} = 1 / \Phi B_{\text{н}}$
13	Продуктивність праці підрозділу, грн./особу	2 418 889	$\Pi\Pi_{\text{н}} = (B_{\text{н}} \cdot \Pi) / \chi_{\text{спн}}$
14	Коефіцієнт економічної ефективності	1.66	$E = 1 / T_{\text{пов}}$

## 5.8 Висновки

Проаналізувавши розраховані техніко-економічні показники для проектного підприємства можна зробити висновок про те, що провадження нової бізнес-ідеї позитивно відображається на ключових показниках за рахунок того що зменшується собівартість готової продукції.

## ВИСНОВКИ

1. Проведене патентне дослідження показало, що в даний час застосовуються різні типи апаратів, що проектуються. Їх різноманіття обумовлюється сферою їх використання, особливістю теплових режимів та масообмінних процесів, що підтримуються під час проведення технологічного процесу. Патентний пошук та огляд літератури підтвердили відповідність обраної конструкції у виробництві лимонної кислоти, сучасному науково-технічному рівню.

2. Розглянуті математичні моделі процесу випарювання та модель технологічного розрахунку режимів випарювання.

3. Створена 3D модель випарного апарату з виносною гріючою камерою. При навантаженні елементів виявилось, що умова стійкості та міцності виконується. Деформації конструктивних елементів в допустимих діапазонах.

4. Проведені розрахунки теплового та матеріального балансу, конструктивний розрахунок апарата, визначені основні габаритні розміри та максимальні напруження в апараті.

5. З розрахунків стартап-проекту очевидно, що впровадження даної бізнес ідеї відкриє нові можливості для виробника випарних апаратів для харчової промисловості, а саме виробництва лимонної кислоти. Завдяки даній конструкції випарного апарату з виносною гріючою камерою можливо як зменшити затрати на виробництво лимонної кислоти, так і зекономити на придбанні випарної установки.



## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

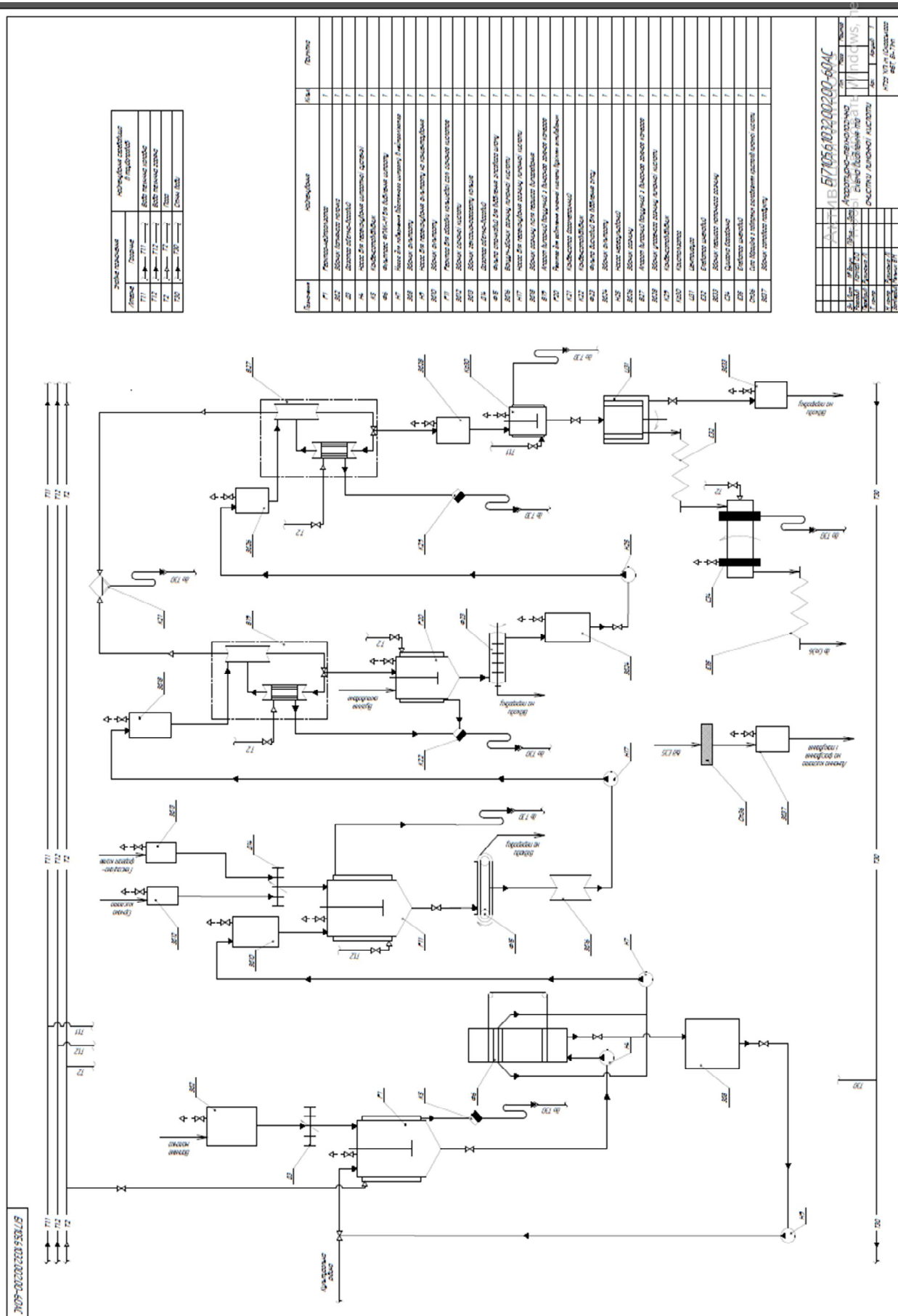
1. Карклиныш Р. Я., Пробок А. К. Биосинтез органических кислот / Рига: «Зинатне», 1972 – 244с.
2. Смирнов В. А. Пищевые кислоты (лимонная, молочная, винная) / М.: «Легкая и пищевая промышленность», 1983 – 264с.
3. Бекер М. Е. Введение в биотехнологию / М.: «Пищевая промышленность», 1978 – 234с.
4. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / М.: «Государственное научно-техническое издательство химической литературы», 1961 – 832с.
5. Чернобыльский И. И. Машины и аппараты химической промышленности // Учебное пособие / Москва-Киев «Машгиз», 1962 – 524 с.
6. Остапчук Н. В. Основы математического моделирования процессов пищевых производств / К.: «ВЫЩА ШКОЛА», 1991 – 367с.
7. Конечно-элементный анализ в SolidWorks Simulation <https://cadregion.ru/solidworks-simulation/konechno-elementnyj-analiz-v-solidworks-simulation.html>
8. ГОСТ 5632-72. Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные // Марки.
9. ГОСТ 380-94. Сталь углеродистая обычная качественная // Марки.
10. ГОСТ 4543-71. Прокат из легированной конструктивной стали // Технические условия.
11. Михалева М. Ф. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств // Примеры и задачи / ЛЭТИ – Л.: «Машиностроение», 1984 – 301с.
12. Соколов В. А., Яблокова М. А. Аппаратура микробиологической промышленности / Л.: «Машиностроение. Ленинград», 1988 – 277с.
13. ГОСТ 11987-81. Аппараты выпарные трубчатые стальные.

14. Лашинский А. А., Толчинский А. Р. Конструирование сварных химических аппаратов // Справочник / ЛЭТИ – Л.: «Машиностроение», 1963 – 465с.
15. Фарамазов С. А. Ремонт и монтаж химических и нефтеперерабатывающих заводов // Учебник для техникумов. Изд. 3-е / М.: «Химия», 1988 – 304с.
16. Соколова В. Н. Машины и аппараты химических производств // Примеры и задачи / ЛЭТИ – Л.: «Машиностроение», 1984 – 384с.
17. Павлов К. Ф., Романов П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии // Учебное пособие для вузов. Изд. 10-е / Л.: «Химия», 1987 – 576с.
18. Каталог электродвигателей предприятия «Барабанчинский электрозавод им. Калинина»
19. Справочник химика // Второе издание. В 7 томах. Том 2-3 / Москва-Ленинград: Химия, 1966.
20. Лощинский А. А., Толчинский А. Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. Изд. 2-е / ЛЭТИ – Л.: «Машиностроение», 1970 – 752с.
21. Доброногов В.Г., Мікульонок І. О. Конструювання опорних вузлів хімічних апаратів і перевірка несучої спроможності обичайок на дію опорних навантажень // навчальний посібник для студентів / К.: КПІ, 1995 – 184с.
22. Доброногов В. Г., Зубрій О. Г., Воронін Л. Г. Алгоритм розрахунку на вібростійкість валів механічних перемішуючих пристроїв // Методичні вказівки / Київ КПІ, 1988 – 39с.
23. Методические указания к выполнению контрольных работ по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии». Часть 1/ Киев КПИ, 1989 – 87с.
24. Константинов С. М., Луцик Р. В. Збірник задач з технічної

- термодинаміки // Навчальний посібник / К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2002 – 380с.
25. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии // Учебник для вузов в 2-ух частях. Часть I / М.: «Химия», 1995 – 400с.
26. Под. ред. Стабникова В. Н. Проектирование процессов и аппаратов пищевых производств / К.: «Вища школа», 1982 – 301с.
27. Под. ред. Дытнерского Ю. И. Основные процессы и аппараты химической технологии // Пособие по проектированию / М.: «Химия», 1991 – 496с.
28. Підлісна О. А., Янковий В. В., Дорошенко М. П. Методичні вказівки до виконання організаційно-економічної частини дипломних проектів / К.: «Політехніка» НТУУ «КПІ», 2002 – 28с.

## Додаток А

Апаратурно-технологічна схема виділення та очистки лимонної кислоти



Додаток А

Апаратурно-технологічна схема виділення та очистки лимонної кислоти

Додаток Б

Специфікації

**Відгук**  
**наукового керівника магістерської дисертації**  
**на здобуття ступеня магістра**

виконаний на тему: «Модернізація установки виробництва лимонної кислоти»  
студентом групи БІ-71мп Комлевом Олексієм Олександровичем

Дисертація здобувача складається з: Апаратурно-технологічна схема виділення та очистки лимонної кислоти (А1); Випарний апарат з виносною гріючою камерою. Складальні креслення (А0); Корпус гріючої камери. Складальне креслення (А2); Кришка сепаратора. Складальне креслення (А2); Решітка трубна (А3); Труба вентиляційна (А3); Корпус бризкоуловлювача (А3); Кришка. Складальне креслення (А3); 3 плакати на перерахунок формату А1 та розрахунково-пояснювальної записки обсягом 167 сторінок.

У роботі розглядаються процеси концентрування розчину лимонної кислоти у випарному апараті з виносною гріючою камерою. Також, у роботі описане моделювання процесів випарювання, модель технологічного розрахунку режимів випарювання та проведено розрахунки, що описують залежність коефіцієнта теплопередачі від тиску гріючої пари. Проведено аналіз існуючих конструкцій випарних апаратів та їх характеристик.

При теоретичному дослідженні докладно розглянуто процес випарювання та проаналізовані фактори, що впливають на нього. Проведені розрахунки теплового та матеріального балансу, конструктивний розрахунок апарата, визначені основні габаритні розміри та максимальні напруження в апараті.

Представлені в роботі 3D модель та конструктивні елементи випарного апарату свідчать про достатньо високий рівень знання сучасних програмних засобів автоматизованого проектування.

Виконаний стартап-проект засвідчив доцільність освоєння промислового виготовлення випарних установках.

Усі креслення та пояснювальна записка виконана з використанням ПК, а саме прикладних програм Microsoft Office Word 2017 та КОМПАС-3D V17, Solidworks 2017. Пояснювальна записка та графічна частина виконана у відповідності до норм Держстандарту.

Вважаю, що магістерська дисертація студента Комлева Олексія Олександровича заслуговує на присвоєння ступеня магістра за спеціальністю 133 галузеве машинобудування та освітньої кваліфікації «магістр з галузевого машинобудування».

**Науковий керівник**

К.Т.Н., доцент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Л.І. Ружинська



## ЗВІТ

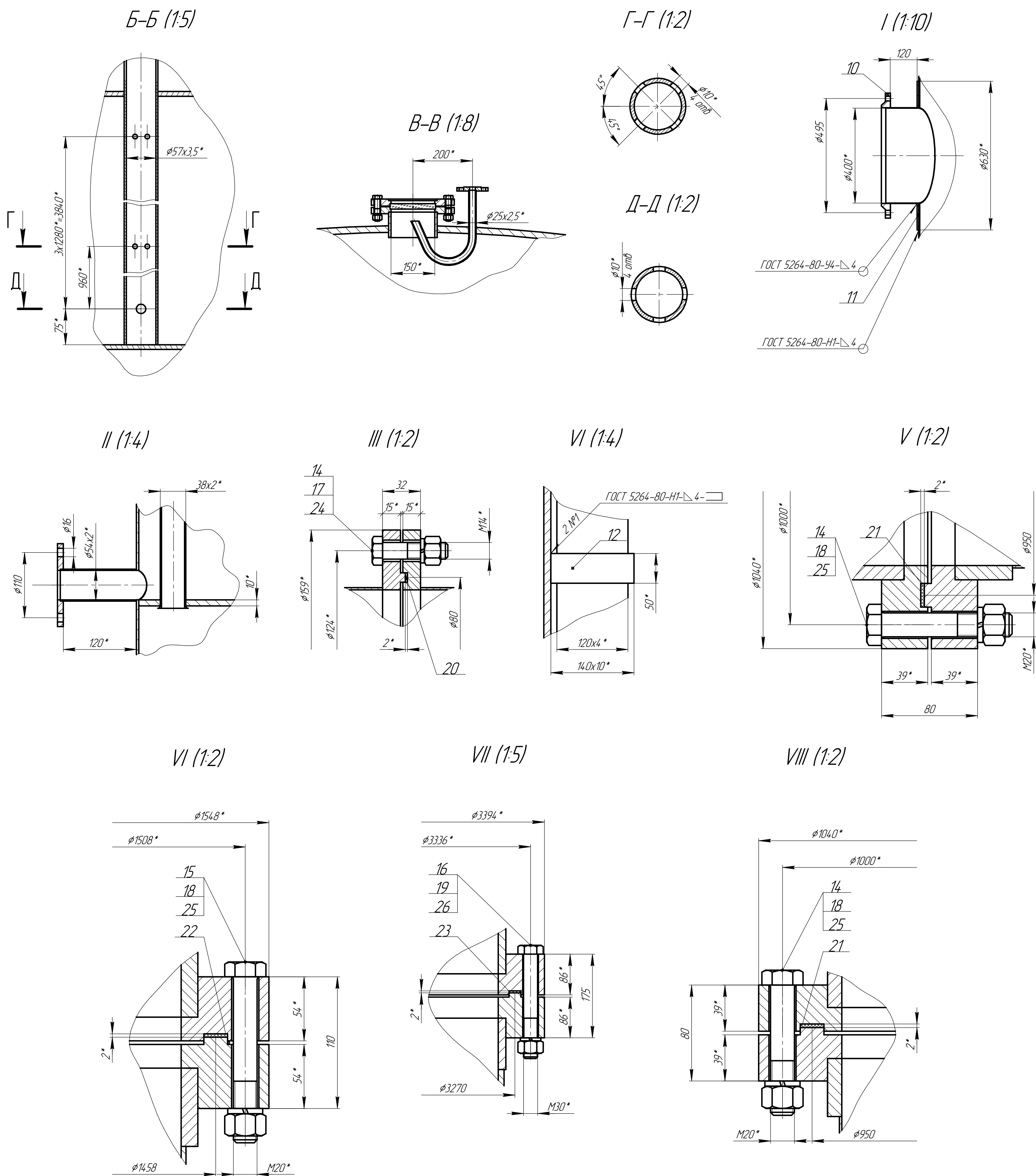
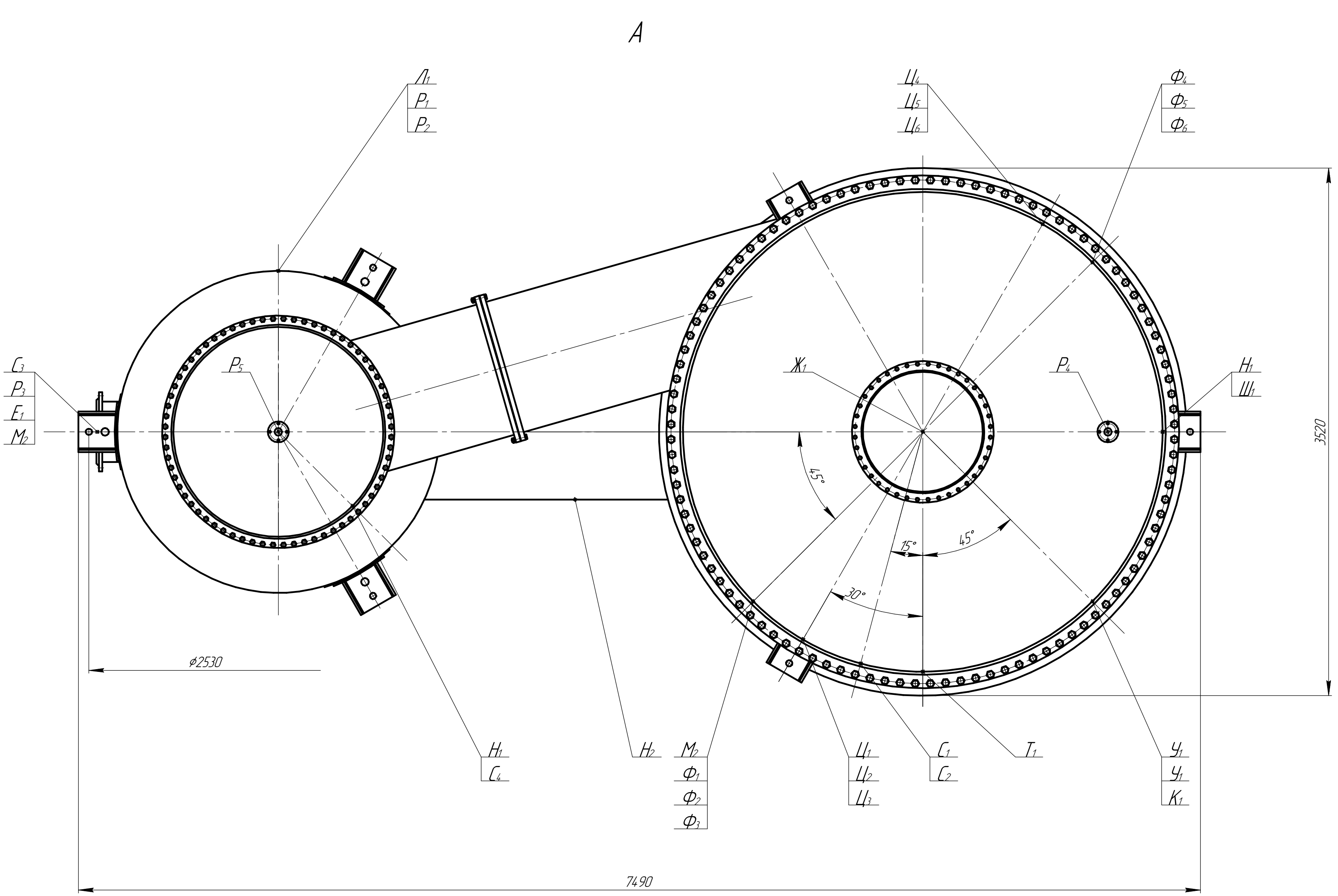
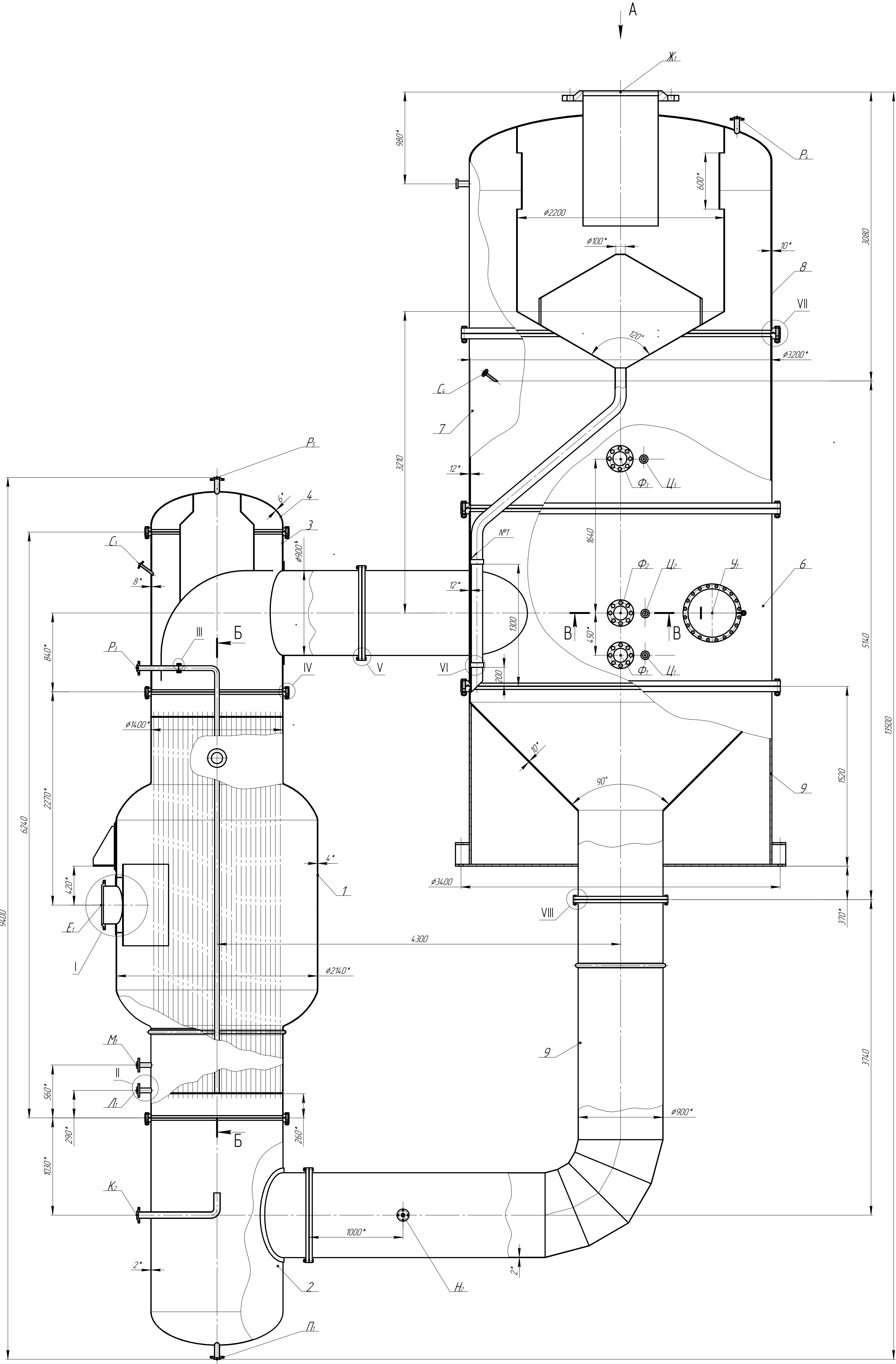
з проведеної магістерської роботи студента:

Комлєва Олексія Олександровича

науковий керівник: к.т.н. доцент Ружинська Людмила Іванівна

Відповідно до календарного плану проведення роботи над магістерською дисертацією, було виконано:

- проведений аналіз літературних джерел ( предмет і об'єкт дослідження; аналіз стану проблеми випарювання на виробництві лимонної кислоти);
- сформовано мету та задачі досліджень за обраною темою;
- підготовлені матеріали та проведений аналіз конструкцій випарних установок для різних типів виробництва;
- проведений патентний пошук та огляд літератури на корисні моделі випарних апаратів;
- досліджені математичні моделі процесів випарювання та вплив різних параметрів на даний процес;
- Виконана побудова 3D моделі випарного апарату з виносною гріючою камерою. Застосовувалось програмне забезпечення SolidWorks, також за його допомогою проводились розрахунки на міцність та стійкість окремих конструктивних елементів випарного апарату.
- Проведений вибір матеріалів для виготовлення випарного апарату та виконані розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність конструкції випарного апарату з виносною гріючою камерою.
- Розроблений стартап проект. Проаналізовані розраховані техніко-економічні показники для проектного підприємства показують, що провадження нової бізнес-ідеї позитивно відображається на ключових показниках.

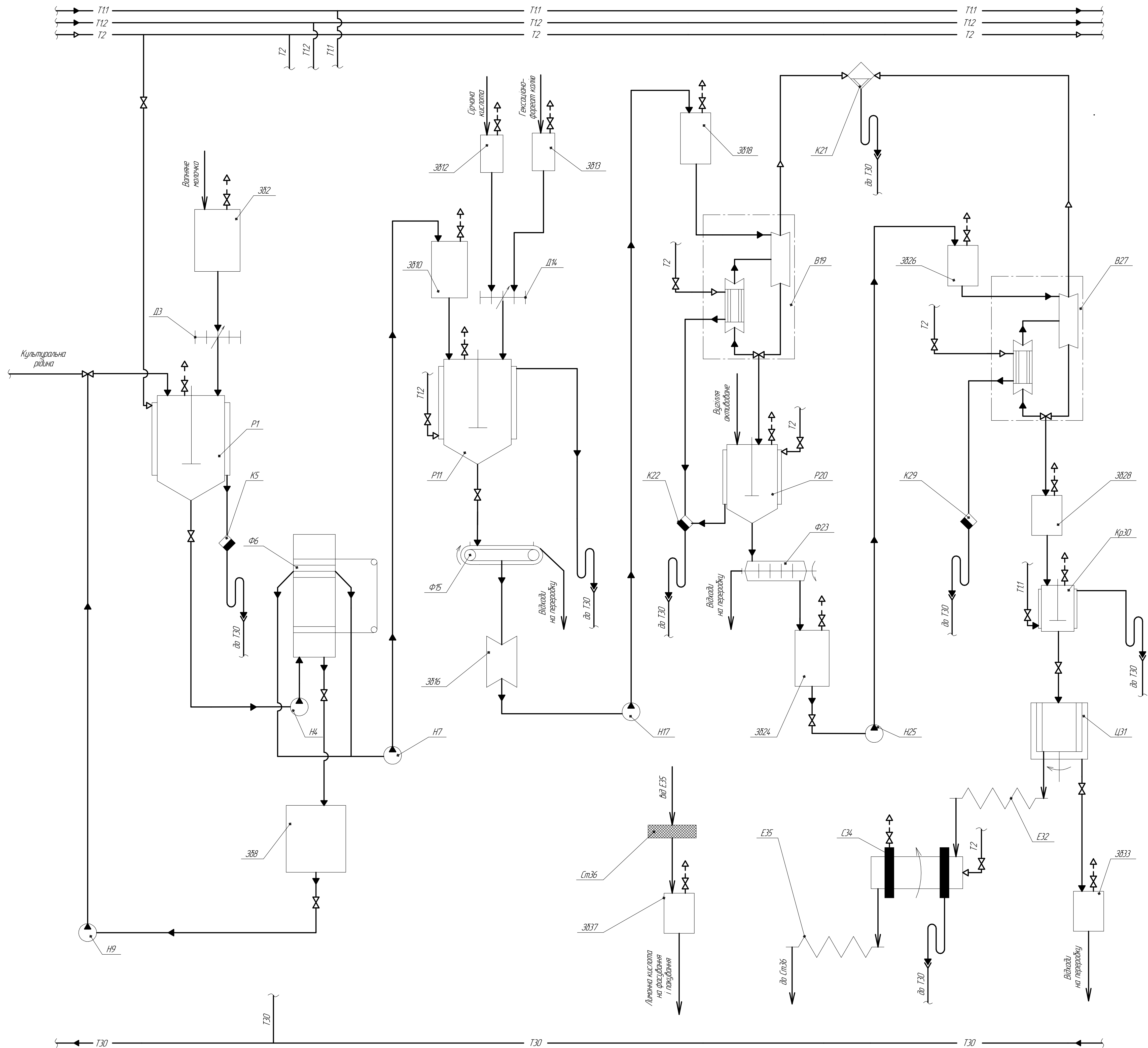


Таблиця шпунерів					
Позначення	Найменування	Кіл.	Прокід умовний, мм	Тиск умовний, МПа	Примітки
Е <sub>1</sub>	Вхід греючої пари	1	400	10	
Ж <sub>1</sub>	Вихід вторинної пари	1	800	10	
К <sub>1-2</sub>	Вхід розчину	2	65	10	
Л <sub>1</sub>	Вихід конденсату	1	50	10	
М <sub>1-2</sub>	Для промивання	2	50	10	
Н <sub>1-2</sub>	Відбір проб	2	40	10	
П <sub>1</sub>	Злив	1	50	10	
Р <sub>1-5</sub>	Для з'єднання з атмосферою	5	50	10	
С <sub>1-4</sub>	Гільза терпару	4	25	2,5	
Г <sub>1</sub>	Гільза манометру	1	25	16	
У <sub>1-2</sub>	Лок	2	500	0,6	
Ф <sub>1-6</sub>	Вікна оглядово	6	150	10	
Ц <sub>1-6</sub>	Для промивання оглядового вікна	6	20	10	
Ш <sub>1</sub>	Гільза барометра	1	40	10	

Технічна характеристика		
1. Апарат призначений для упарювання розчину лимонної кислоти		
2. Концентрація розчину, % (мас)		
початкова	15	
кінцева	65	
3. Продуктивність, кг/с		
по вихідному продукту	2,89	
по кінцевому продукту	0,667	
по випарений волозі	2,223	
4. Площа поверхні теплообміну, м <sup>2</sup>	250	
5. Середовище у апараті	розчин лимонної кислоти, додана пара	
у міжтрубному просторі	насичена додана пара	
у трубному просторі	розчин лимонної кислоти	
6. Тиск, МПа		
у сепараторі	0,08	
у міжтрубному просторі	0,4	
у трубному просторі	0,1	
7. Температура, °С		
у сепараторі	94	
у міжтрубному просторі	144	
у трубному просторі	102	
8. Габаритні розміри, мм		
довжина	7490	
ширина	3520	
висота	13500	
9. Маса, кг	15000	

Технічні вимоги		
1. При виготовленні апарату керуватись ГОСТ 12.2.003-91		
2. Корпус апарату та деталі що контактують з розчином який упарюється виготовляти із сталі 1Х21Н5Т ГОСТ 5632-72, опори - зі сталі 45Х ГОСТ 4543-71 інші деталі - зі сталі 3 ДСТУ 2651:2005 (ГОСТ 380-2005).		
3. Усі зварні шви вказані за ГОСТ 5264-80.		
4. Зварні з'єднання контролюються рентгенопробним методом у об'ємі 100% за ОСТ 26-291-71. Зварні з'єднання нержавіючих сталей контролюються на стійкість проти міжкристалічної корозії за ГОСТ 6032-84.		
5. Виліт шпунерів 120мм.		
7. Ділисне розмішування шпунерів, опар, оглядових вікон дивись на вигляд А.		
*Розміри для довідок.		

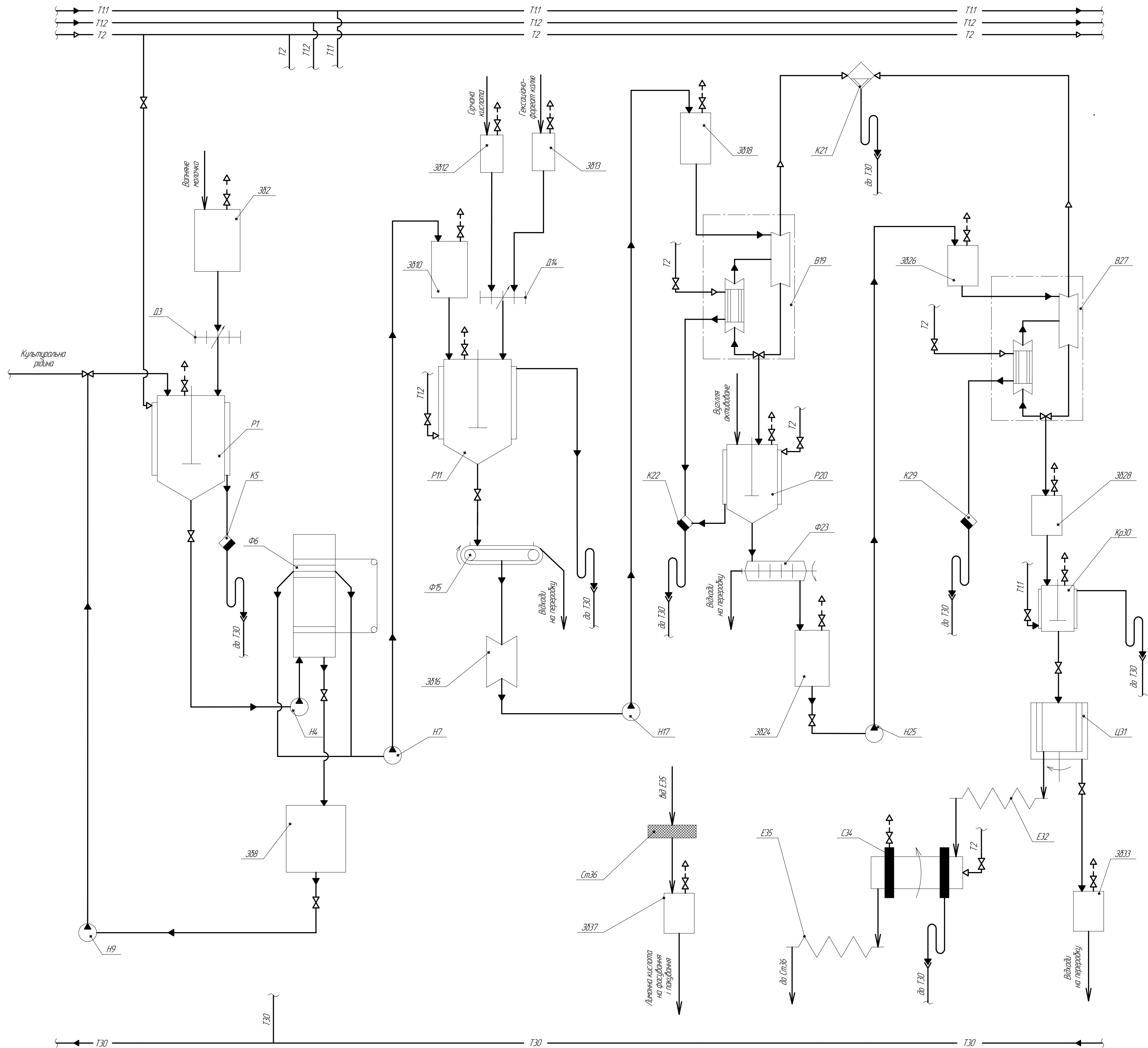
				БІ7105.6.1032.00100-60СБ		
Зм. Розроб.	Пр. Директ.	Лінійн.	Діагн.	Випарний апарат з високим зривним ковпачком. Складальне креслення.		
Розробив	Контроль	Лінійн.	Діагн.			
Перевірив	Розробив	Лінійн.	Діагн.	Лист	15000	120
Н. контро.	Розробив	Лінійн.	Діагн.	Лист	1	1
Затвердив	Розробив	Лінійн.	Діагн.	НТЗУ "КТІ" ім. І.Саварського ФБТ, БІ-7мт		



Умовне позначення		Найменування середовища в трудовій
Літерне	Графічне	
T11		Вода технічна холодна
T12		Вода технічна гаряча
T2		Пара
T30		Січні води

Позначення	Найменування	Кільк.	Примітка
P1	Реактор-нейтралізатор	1	
ЗБ2	Збірник вапняного молочка	1	
D3	Дозатор об'ємно-ваговий	1	
H4	Насос для перекачування цитратної суспензії	1	
K5	Конденсатодівідник	1	
F6	Фільтр-прес ФІТАК-М для виділення цитрату	1	
H7	Насос для підвернення відстояного цитрату в нейтралізатор	1	
ЗБ8	Збірник фільтрату	1	
H9	Насос для перекачування фільтрату на концентрування	1	
ЗБ10	Збірник фільтрату	1	
P11	Реактор для обробки кальцевої солі сірчаною кислотою	1	
ЗБ12	Збірник сірчаної кислоти	1	
ЗБ13	Збірник гексаціанфторату кальцію	1	
D14	Дозатор об'ємно-ваговий	1	
F15	Фільтр стрічковий для відділення гіпсового шлам	1	
ЗБ16	Вакуум-збірник розчину лимонної кислоти	1	
H17	Насос для перекачування розчину лимонної кислоти	1	
ЗБ18	Збірник розчину після першого випаровування	1	
B19	Апарат випарний вакуумний з виносною зрізною камерою	1	
P20	Реактор для освітлення лимонної кислоти вузелям активуванням	1	
K21	Конденсатор барометричний	1	
K22	Конденсатодівідник	1	
F23	Фільтр дисковий для відділення гіпсу	1	
ЗБ24	Збірник фільтрату	1	
H25	Насос нерегульований	1	
ЗБ26	Збірник розчину	1	
B27	Апарат випарний вакуумний з виносною зрізною камерою	1	
ЗБ28	Збірник упареного розчину лимонної кислоти	1	
K29	Конденсатодівідник	1	
Kр30	Кристалізатор	1	
Ц31	Центрифуга	1	
E32	Елеватор шнековий	1	
ЗБ33	Збірник першого маточного розчину	1	
E34	Сушарка барабанна	1	
E35	Елеватор шнековий	1	
Ст36	Сито вібраційне з подвійним охолодженням кристалів лимонної кислоти	1	
ЗБ37	Збірник готового продукту	1	

						БІ7105.61032.002.00-60AC					
						Апаратурно-технологічна схема виділення та очищення лимонної кислоти					
						Лист		Маса		Моштовість	
						Арк.		Архівів		1	
						НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського" ФЕТ, БГ-71п					
Зм. / Лист											
Розробив											
Перевірив											
Т. контр.											
Н. контр.											
Завербив											

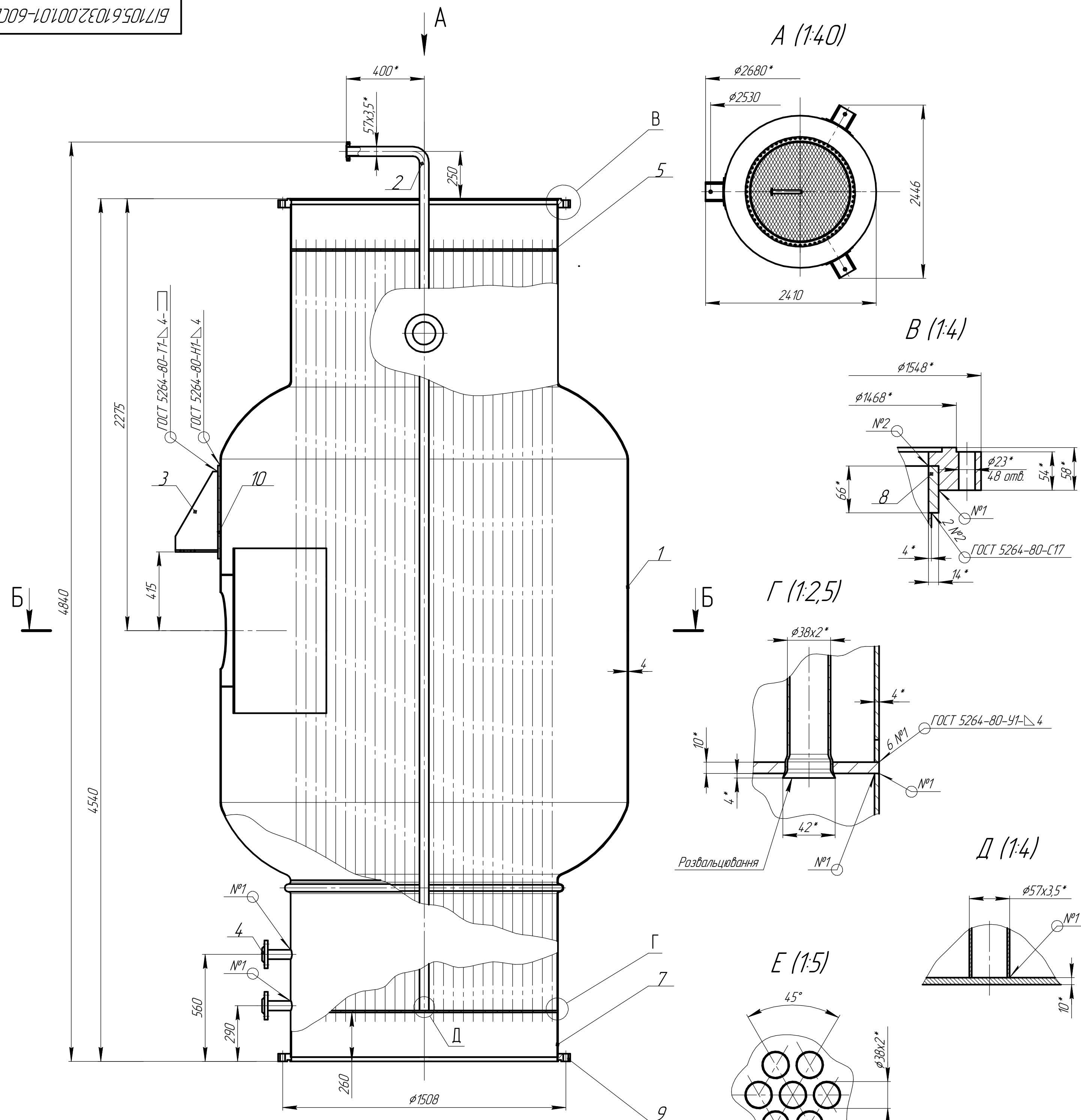


Умовне позначення		Найменування середовища в трудовій
Літерне	Графічне	
T11		Вода технічна холодна
T12		Вода технічна гаряча
T2		Пара
T30		Січні води

Позначення	Найменування	Кільк.	Примітка
P1	Реактор-нейтралізатор	1	
З82	Збірник вапняного молочка	1	
D3	Дозатор об'ємно-ваговий	1	
H4	Насос для перекачування цитратної суспензії	1	
K5	Конденсатодівідник	1	
F6	Фільтр-прес ФІТАК-М для виділення цитрату	1	
H7	Насос для підвернення відстояного цитрату в нейтралізатор	1	
З88	Збірник фільтрату	1	
H9	Насос для перекачування фільтрату на концентрування	1	
З810	Збірник фільтрату	1	
P11	Реактор для обробки кальцевої солі сірчаною кислотою	1	
З812	Збірник сірчаної кислоти	1	
З813	Збірник гексаціанфторату кальцію	1	
D14	Дозатор об'ємно-ваговий	1	
F15	Фільтр стрічковий для відділення гіпсового шлам	1	
З816	Вакуум-збірник розчину лимонної кислоти	1	
H17	Насос для перекачування розчину лимонної кислоти	1	
З818	Збірник розчину після першого випаровування	1	
B19	Апарат випарний вакуумний з виносною зрізною камерою	1	
P20	Реактор для освітлення лимонної кислоти вузелям активуванням	1	
K21	Конденсатор барометричний	1	
K22	Конденсатодівідник	1	
F23	Фільтр дисковий для відділення гіпсу	1	
З824	Збірник фільтрату	1	
H25	Насос нерегульований	1	
З826	Збірник розчину	1	
B27	Апарат випарний вакуумний з виносною зрізною камерою	1	
З828	Збірник упареного розчину лимонної кислоти	1	
K29	Конденсатодівідник	1	
Kр30	Кристалізатор	1	
Ц31	Центрифуга	1	
E32	Елеватор шнековий	1	
З833	Збірник першого маточного розчину	1	
E34	Сушарка барабанна	1	
E35	Елеватор шнековий	1	
Ст36	Сито вібраційне з подвійним охолодженням кристалів лимонної кислоти	1	
З837	Збірник готового продукту	1	

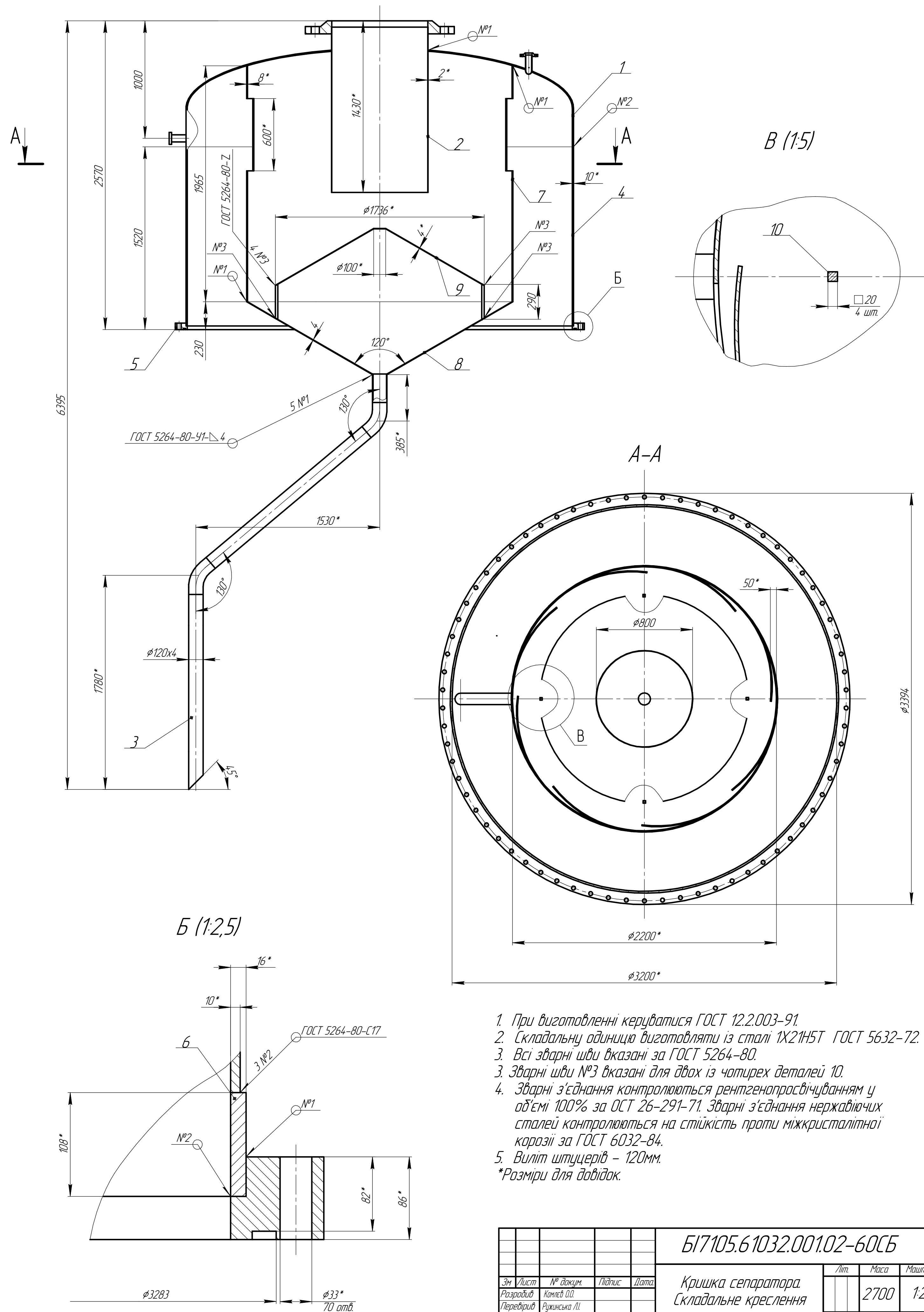
					БІ7105.61032.002.00-60AC						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис:	Дата:	Апаратурно-технологічна схема виділення та очищення лимонної кислоти				Лит.	Маса	Моштовд
Розробив		Камішев ОО									
Перевірив		Радинська ЛІ									
T. контр.											
									Арк.	Архівов.	I
H. контр.		Радинська ЛІ							НТУУ «КПІ ім. Ігоря Скорисякого» ФБТ, БГ-71пн		
Завербив		Мельник ВМ									





1. При виготовленні керуватися ГОСТ 12.2.003-91.
  2. Складальну одиницю виготовляти із сталі 1Х21Н5Т ГОСТ 5632-72, опори – зі сталі 45Х ГОСТ 4543-71.
  3. Всі зварні шви вказані за ГОСТ 5264-80.
  4. З'єднання контролюються рентгенопробіруванням у об'ємі 100% за ОСТ 26-291-71. З'єднання нержавіючих сталей контролюються на стійкість проти міжкристалітної корозії за ГОСТ 6032-84.
  5. Виліт штуцерів – 120мм.
  6. Кут між опорами 120°.
- \*Розміри для довідок.

					БІ/7105.61032.001.01-60СБ				
Зм	Лист	№ докум	Підпис	Дата	Корпус зріючої камери. Складальне креслення		Лист	Маса	Маштаб
Розробив	Комель Ю							5000	1:5
Перевірив	Рижиківська ЛІ								
Т. контр							Листів	1	
Н. контр	Рижиківська ЛІ				НТУУ "КПІ ім.Євдокіма Сімоновського" ФБТ, БІ-71м				
Затвердив	Мельник ВМ								

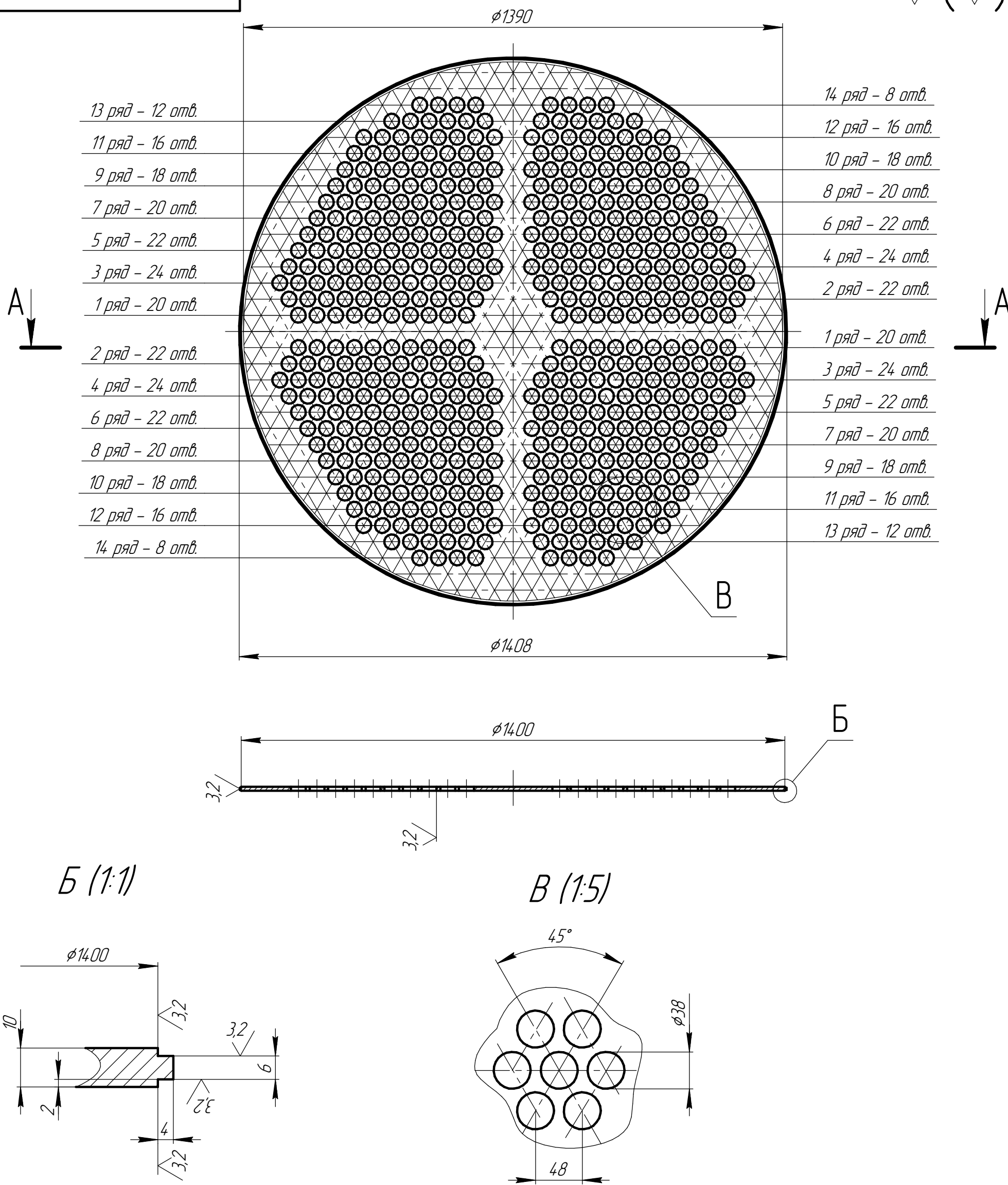


1. При виготовленні керуватися ГОСТ 12.2.003-91.
  2. Складальну одиницю виготовляти із сталі 1Х21Н5Т ГОСТ 5632-72.
  3. Всі зварні шви вказані за ГОСТ 5264-80.
  4. Зварні шви №3 вказані для двох із чотирьох деталей 10.
  5. Зварні з'єднання контролюються рентгенографічним у об'ємі 100% за ОСТ 26-291-71. Зварні з'єднання нержавіючих сталей контролюються на стійкість проти міжкристаліної корозії за ГОСТ 6032-84.
  5. Виліт шпунцерів – 120мм.
- \*Розміри для довідок.

						<i>БІ7105.61032.001.02-60СБ</i>					
						<i>Кришка сепаратора складальне креслення</i>			<i>Лист</i>	<i>Маса</i>	<i>Машинад</i>
										<i>2700</i>	<i>120</i>
									<i>Лист</i>	<i>Листів</i>	<i>г</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>					<i>НТУУ КП ІМІС Корського ФБТ, БІ-7мп</i>		
<i>Розробив</i>		<i>Коміс ВШ</i>									
<i>Перевірив</i>		<i>Рушницька ЛІ</i>									
<i>Г. контр.</i>											
<i>Н. контр.</i>		<i>Рушницька ЛІ</i>									
<i>Запідтвердив</i>		<i>Мельник ВМ</i>									

БІ7105.61032.00103-60СБ

63 (✓)

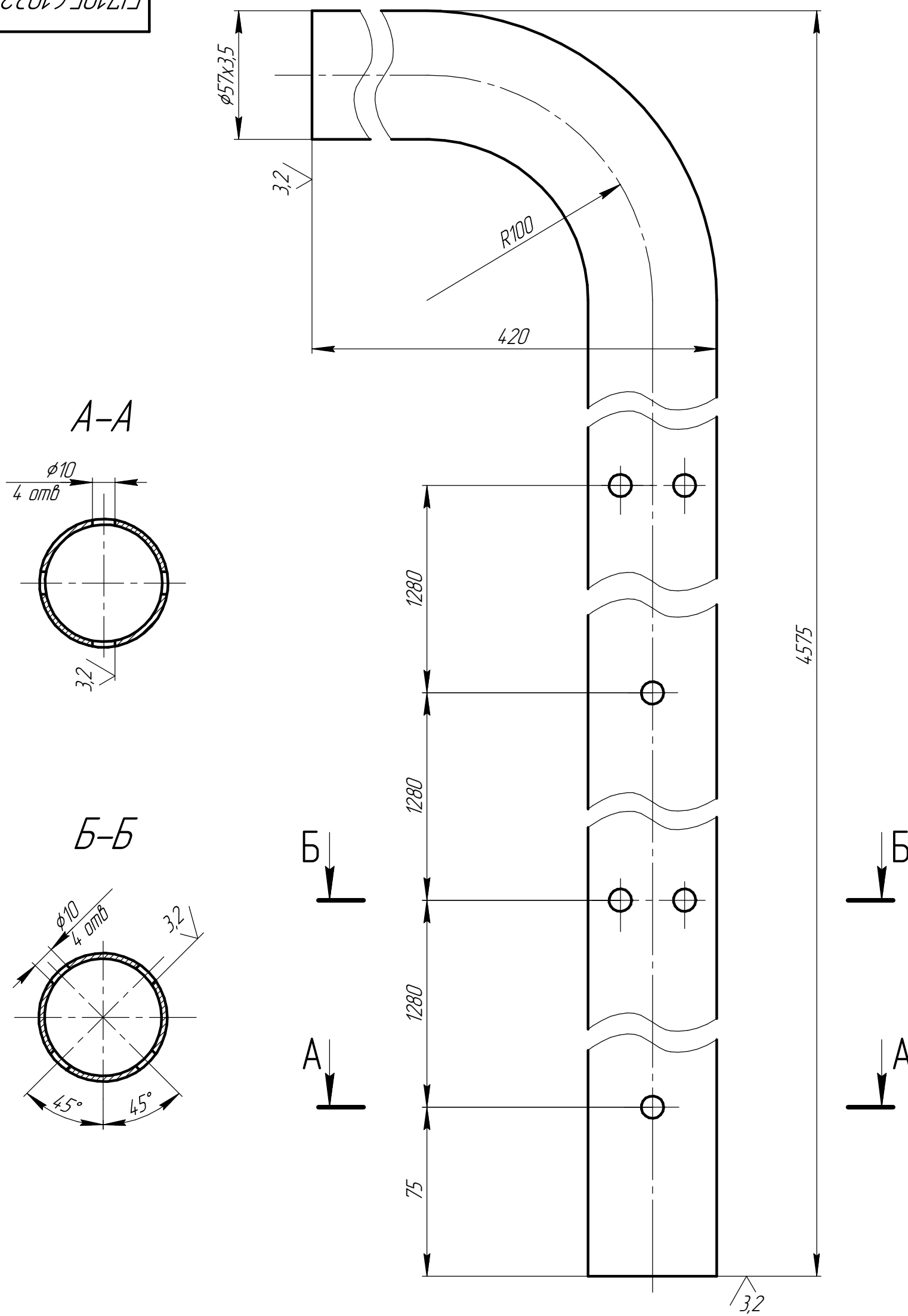


1. При виготовленні деталі керуються ГОСТ 12.2.003-91.
2. Термообробка- Нормалізація 170-190 НВ.
3. Невказані граничні відхилення розмірів отворів Н14, і всі інші +ІТ 14/2.

					БІ7105.61032.00103-60СБ				
Зм	Лист	№ докум	Підпис	Дата	Решітка трубна		Лист	Маса	Маштаб
Розробив	Команд ОО							84	1:10
Перевірив	Рижинська ЛІ								
Т. контр							Лист	Листів	1
Н. контр	Рижинська ЛІ				Лист	1408x10 ГОСТ 19904-90 Сталь 1Х21Н5Т ГОСТ 5632-72	НТУУ "КПІ ім.Сікорського" ФБТ, БІ-71мп		
Затвердив	Мельник ВМ								

БІ7105.61032.00104-60СБ

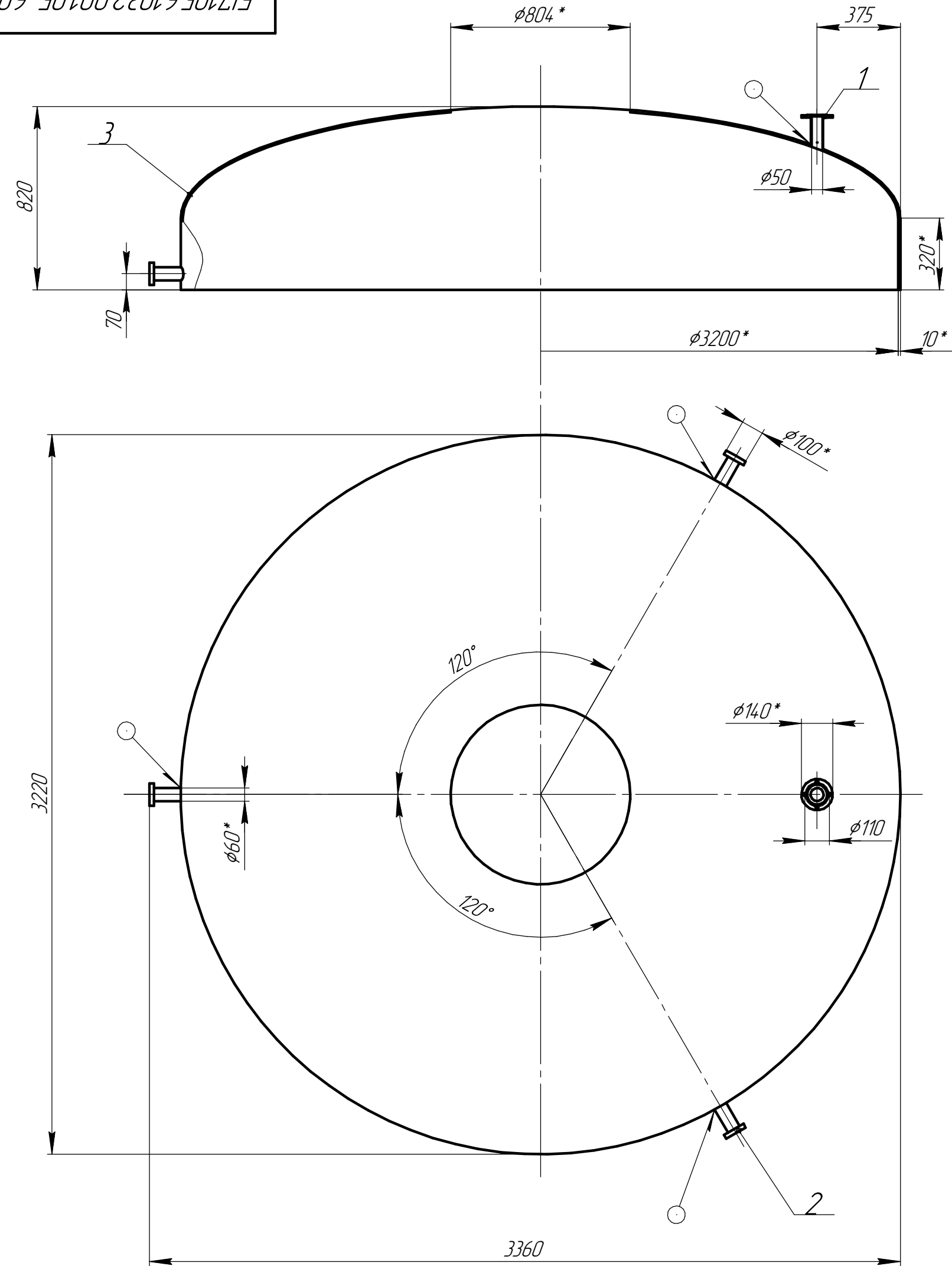
63 (✓)



1. При виготовленні деталі керуються ГОСТ 12.2.003-91.
2. Невказані граничні відхилення розмірів отворів Н14, і всі інші +ІТ 14/2.
3. Розташування отворі зображене на розрізах А-А і Б-Б дублюється через 2360мм.

					Б/7105.61032.001.04-60СБ			
Зм	Лист	№ докум	Підпис	Дата	Труба вентиляційна	Лист	Маса	Маштаб
Розробив	Коміве ОО					90	1:2	
Перевірив	Рижинська ЛІ					Лист	Листів 1	
Т. контр					Труба Ø 57x35x5250 ГОСТ 8731-74 Сталь 1Х21Н5Т	НТУУ "КПІ ім.Сікорського" ФБТ БІ-71мп		
Н контр	Рижинська ЛІ							
Затвердив	Мельник ВМ							

БІ7105.61032.00105-60СБ

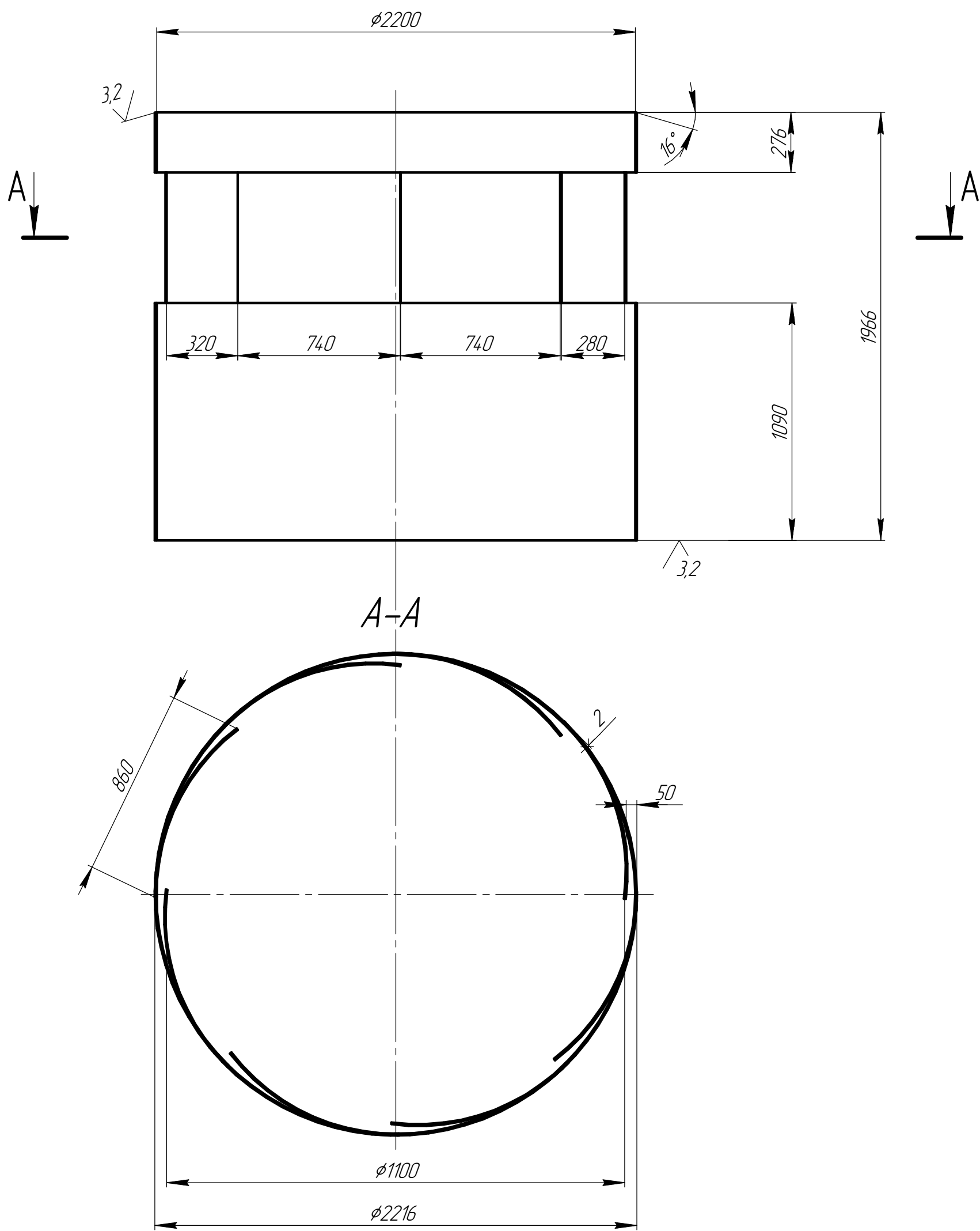


1. При виготовленні кервуться ГОСТ 12.2.003-91.
  2. Складальну одиницю виготовляти із сталі 1Х21Н5Т ГОСТ 5632-72.
  3. Всі зварні шви вказані за ГОСТ 5264-80-У1-4. 4 шви.
  4. Виліт шпунців - 120мм.
- \*Розміри для довідок.

					БІ7105.61032.00105-60СБ				
Зм	Лист	№ докум	Підпис	Дата	Кришка Складальне креслення				
Розробив		Команд ОО							
Перевірив		Рижинська ЛІ				Лист	Маса	Маштаб	
Т. контр							2400	1:20	
Н. контр		Рижинська ЛІ				Лист	Листів 1		
Затвердив		Мельник ВМ				НТУУ "КПІ ім.Сікорського" ФБТ, БІ-71мп			

БІ7105.61032.00106-60СБ

63 (✓)



1. При виготовленні деталі керуються ГОСТ 12.2.003-91.
2. Невказані граничні відхилення розмірів отворів Н14, і всі інші +ІТ 14/2.
3. Зварні з'єднання контролюються рентгенопросвічуванням у од'ємі 100% за ОСТ 26-291-71.

					Б/7105.61032.001.06-60СБ				
Зм	Лист	№ докум	Підпис	Дата	Корпус бризкоуловлювача		Лист	Маса	Маштаб
Розробив	Команд ОО							1210	1:20
Перевірив	Рижинська ЛІ								
Т. контр									
Н. контр	Рижинська ЛІ				Лист	6970x1966x4 ГОСТ 19904-90 Сталь 1Х21Н5Т ГОСТ 5632-72	Листів	1	
Затвердив	Мельник ВМ							НТУУ "КПІ ім.Сікорського" ФБТ, БІ-71мп	

Перв. застосув.		Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
						Документація		
А0					БІ7105.61032.001.00-60СБ	Складальне креслення	1	
						Складальні одиниці		
БК			1		БІ7105.61032.001.01-60	Корпус зріючої камери	1	
БК			2		БІ7105.61032.001.02-60	Днище зріючої камери	1	
БК			3		БІ7105.61032.001.03-60	Царга зріючої камери	1	
БК			4		БІ7105.61032.001.04-60	Кришка зріючої камери	1	
БК			5		БІ7105.61032.001.05-60	Днище сепаратора	1	
БК			6		БІ7105.61032.001.06-60	Царга сепаратора нижня	1	
БК			7		БІ7105.61032.001.07-60	Царга сепаратора верхня	1	
БК			8		БІ7105.61032.001.0-60	Кришка сепаратора	1	
БК			9		БІ7105.61032.001.09-60	Труба циркуляційна	1	
						Деталі		
БК			10		БІ7105.61032.001.10-60	Фіксує кільце	2	
						Стандартні вироби		
			11			Болт М14х55		
						ГОСТ 15589-70	4	
			12			Болт М20х110		
						ГОСТ 15589-70	93	
			13			Болт М20х140		
						ГОСТ 15589-70	144	
					БІ7105.61032.001.00-60			
		Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		
Інв. № ориг.	Розроб.	Комлев О.О.					Випарний апарат з виносною зріючою камерою	
	Перев.	Ружинська Л.І.						
	Н. контр.	Ружинська Л.І.					Літ.	Аркуш
	Затв.	Мельник В.М.					1	2
							НТУУ "КПІ ім.І.Сікорського" ФБТ, БІ-71мп	

Перш. викор.		Справ. №		Підп. і дата		Інв. № докл.		Взам. інв. №		Підп. і дата		Інв. № подл.	
Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка							
		14		Болт М30х220 ГОСТ 15589-70	210								
		15		Гайка М14 ГОСТ 155526-70	4								
		16		Гайка М20 ГОСТ 155526-70	237								
		17		Гайка М30 ГОСТ 155526-70	210								
		18		Прокладка 106/57х2 ГОСТ 15180-86	1	Пароніт							
		19		Прокладка 951/925х2 ГОСТ 28759.6-90	3	Пароніт							
		20		Прокладка 1446/1413х2 ГОСТ 28759.6-90	3	Пароніт							
		21		Прокладка 3254/3214х3 ГОСТ 28759.6-90	3	Пароніт							
		22		Шайба 14 ГОСТ 6402-70	4								
		23		Шайба 20 ГОСТ 6402-70	237								
		24		Шайба 30 ГОСТ 6402-70	210								
				Матеріали									
		25		Електроды ЦЛ-11 ГОСТ 9466-75	5								



[illegible]

[illegible]